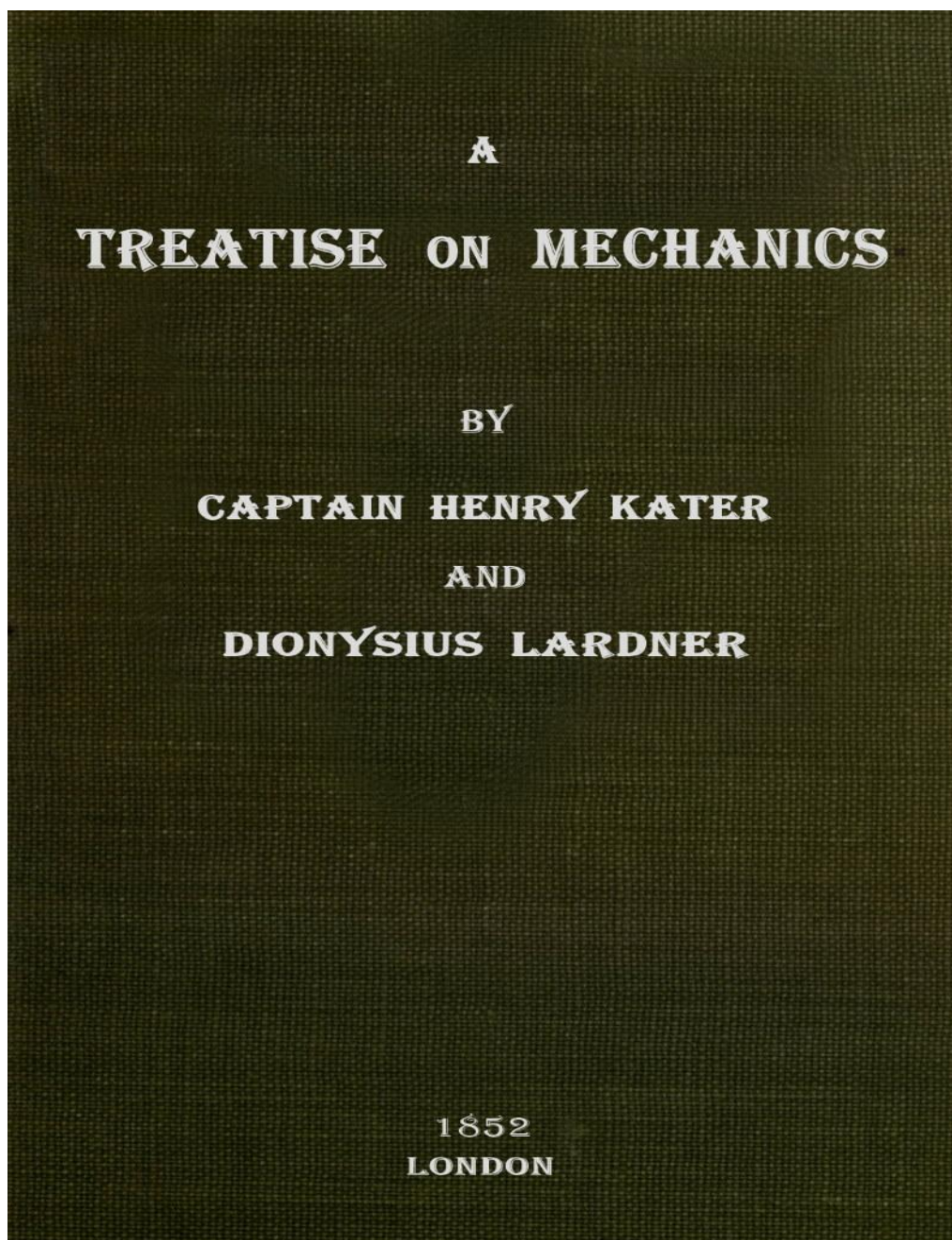


Трактат по механике
Генри Кейтер и Дионисий Ларднер



Содержание

[ТРАКТАТ ПО МЕХАНИКЕ.](#)

[СОДЕРЖАНИЕ.](#)

[ГЛАВА I. СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА — РАЗМЕР — НЕВЗАИМОДЕЙСТВЕННОСТЬ — ФОРМА — СИЛА.](#)

[ГЛАВА II. ДЕЛЕННОСТЬ — ПОРОЗОСТЬ — ПЛОТНОСТЬ — СЖИМАЕМОСТЬ — ЭЛАСТИЧНОСТЬ — РАСТЯЖИМОСТЬ.](#)

[ГЛАВА III. ИНЕРЦИЯ.](#)

[ГЛАВА IV. ДЕЙСТВИЕ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ.](#)

[ГЛАВА V. СОСТАВ И РАЗЛОЖЕНИЕ СИЛЫ.](#)

[ГЛАВА VI. ПРИТЯЖЕНИЕ.](#)

[ГЛАВА VII. ЗЕМНАЯ ГРАВИТАЦИЯ.](#)

[ГЛАВА VIII. ДВИЖЕНИЕ ТЕЛ ПО НАКЛОНЕННЫМ ПЛАНИНАМ И КРИВЫМ.](#)

[ГЛАВА IX. ЦЕНТР ТЯЖЕСТИ.](#)

[ГЛАВА X. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОСИ.](#)

[ГЛАВА XI. О МАЯЧКЕ.](#)

[ГЛАВА XII. О ПРОСТЫХ МАШИНАХ.](#)

[ГЛАВА XIII. О РЫЧАГЕ.](#)

[ГЛАВА XIV. О КОЛЕСНОМ МЕХАНИЗМЕ.](#)

[ГЛАВА XV. О ШКЕВЕ.](#)

[ГЛАВА XVI. О НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ, КЛИНЕ И ВИНТЕ.](#)

[ГЛАВА XVII. О РЕГУЛИРОВКЕ И НАКОПЛЕНИИ СИЛЫ.](#)

[ГЛАВА XVIII. МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ.](#)

[ГЛАВА XIX. О ТРЕНИ И ЖЕСТКОСТИ ВЕРЕВОК.](#)

[ГЛАВА XX. О ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ.](#)

[ГЛАВА XXI. О ВЕСАХ И МАЯЧКАХ.](#)

[УКАЗАТЕЛЬ.](#)

[СНОСКИ:](#)

[ПОЛНАЯ ЛИЦЕНЗИЯ ПРОЕКТА ГУТЕНБЕРГА](#)

Электронная книга проекта «Гутенберг» «Трактат по механике»

Эта электронная книга предназначена для бесплатного использования в любой точке США и большинства других стран мира практически без каких-либо ограничений. Вы можете копировать, передавать или повторно использовать ее в соответствии с условиями лицензии проекта «Гутенберг», включенной в эту электронную книгу или доступной онлайн по [адресу www.gutenberg.org](http://www.gutenberg.org). Если вы не проживаете в США, перед использованием этой электронной книги вам необходимо ознакомиться с законодательством страны, в которой вы проживаете.

Название: Трактат по механике

Автор: Генри Кейтер

Дионисий Ларднер

Дата выпуска: 17 августа 2021 г. [электронная книга № 66078]
Последнее обновление: 18 октября 2024 г.

Язык: английский

Благодарности: Тирс Халлиуэлл, deaurider и команда онлайн-корректоров <https://www.pgdp.net> (Этот файл был создан на основе изображений, любезно предоставленных The Internet Archive)

*** НАЧАЛО ЭЛЕКТРОННОЙ КНИГИ ПРОЕКТА ГУТЕНБЕРГ «ТРАКТАТ О МЕХАНИКЕ» ***

Примечания транскрибатора:

Текст этой электронной книги в основном сохранен в первоначальном виде, включая некоторые несоответствия в переносах и использовании диакритических знаков (aeriform/aëiform). Три орфографические ошибки были исправлены (arrangment → arrangement, pully → pulley, dye → die), как и опечатки в уравнениях на страницах 40 и 43. Некоторые пропущенные знаки препинания были исправлены без указания (точки, запятые, неправильные кавычки). Для удобства читателя были добавлены гиперссылки на оглавление, указатель и сноски, а также на многочисленные перекрестные ссылки в тексте. Сноски находятся в конце книги.

Изображение на обложке книги было создано транскриптором и находится в общественном достоянии.

ТРАКТАТ ПО МЕХАНИКЕ,

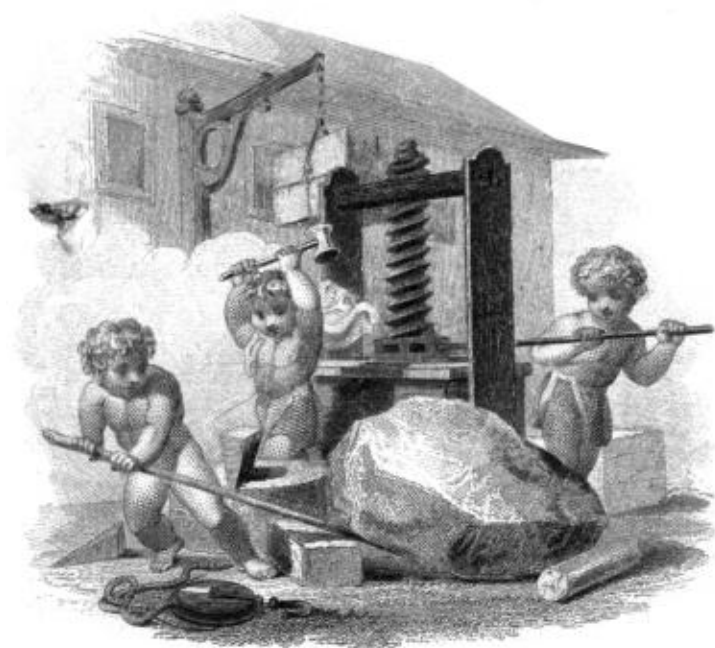
КАПИТАНА ГЕНРИ КАТЕРА, V. PRES: R.S.

— и —

ДИОНИСИУС ЛАРДНЕР, D.C.L. F.R.S. &c. &c.

НОВОЕ ИЗДАНИЕ, ПЕРЕСМОТРЕННОЕ И ИСПРАВЛЕННОЕ.

1852.



H. Corbould del. E. Finder sc.

Лондон:

НАПЕЧАТАНО ДЛЯ LONGMAN, BROWN, GREEN & LONGMANS. PATERNOSTER ROW:

РЕКЛАМА.

Настоящий трактат по механике, впервые опубликованный в 1830 году, является работой доктора Ларднера, за исключением двадцать первой главы, написанной покойным капитаном Катером. Настоящее издание было пересмотрено и исправлено доктором Ларднером.

Лондон, январь 1852 года.

СОДЕРЖАНИЕ.

ГЛАВА I.

СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА.

Органы чувств. — Ощущения. — Свойства или качества. — Наблюдение. — Сравнение и обобщение. — Особые и общие качества.—Величина. —Размер. —Объем. —Линии. — Поверхности. —Края. —Площадь. —Длина. —Непроницаемость. —Кажущаяся проницаемость. —Фигура. —Отличается от объема. —Атомы.—Молекулы.—Разделяемая материя.— Частицы.—Сила.—Сцепление атомов.—Гипотетические фразы ненужны.—Притяжение.

[1](#)

ГЛАВА II.

СВОЙСТВА МАТЕРИИ, ПРОДОЛЖЕНИЕ.

Делимость. — Неограниченная делимость. — Микрометрическая проволока Волластона. — Метод ее изготовления. — Толщина мыльного пузыря. — Крылья насекомых. — Позолота проволоки для вышивания. — Глобулы крови. — Животные.—Их мельчайшая организация. —Конечные атомы. —Кристаллы. —Пористость. —Объем. —Плотность. —Ртуть, проходящая через поры дерева. —Фильтрация. —Пористость гидрофана. —Сжимаемость.— Эластичность.—Расширяемость.—Тепло.—Сжатие металла, используемого для восстановления перпендикуляра к стенам здания.—Непроницаемость воздуха. — Сжимаемость воздуха.—Эластичность воздуха.—Жидкости, не являющиеся абсолютно несжимаемыми. —Эксперименты.—Упругость жидкостей.—Газообразные жидкости.— Домашняя топка.—Выделение тепла сжатым воздухом.

[9](#)

ГЛАВА III.

Инерция.

Инерция. — Вещество, неспособное к самопроизвольным изменениям. — Препятствия движению. — Движение Солнечной системы. — Закон природы. — Язык, используемый для выражения инерции, иногда неточен. — Знакомые примеры инерции.

[27](#)

ГЛАВА IV.

ДЕЙСТВИЕ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ.

Инерция в одном теле. — Последствия инерции в двух или более телах. — Примеры. — Последствия удара. — Движение не оценивается только по скорости или быстроте. — Примеры. — Правило для оценки количества движения. — Действие и противодействие. —

[34](#)

Примеры. — Скорость двух тел после удара.—Правило для нахождения общей скорости после удара.—Магнит и железо.—Перо и пушечное ядро , ударяющиеся друг о друга.—Законы движения Ньютона.—Бесполезность.—Знакомые эффекты, возникающие в результате инерции.

ГЛАВА V.

СОСТАВ И РАЗЛОЖЕНИЕ СИЛЫ.

Движение и давление. — Сила. — Притяжение. — Параллелограмм сил. — Результирующая. — Компоненты. — Состав силы. — Разложение силы. — Наглядные эксперименты.— Составление давлений.—Теоремы, регулирующие давления, также регулируют движение.— Примеры.—Разложение движения.—Силы в равновесии.—Составление движения и давления.—Иллюстрации.—Лодка в течении.—Движения рыб.—Полет птиц.—Паруса судна.—Поворот.—Конные трюки.—Абсолютное и относительное движение.

[48](#)

ГЛАВА VI.

ПРИТЯЖЕНИЕ.

Импульс. — Механическое состояние тел. — Абсолютный покой. — Равномерное и прямолинейное движение. — Притяжение. — Молекулярное или атомное. — Межклеточные пространства в телах. — Отталкивание и притяжение. — Сцепление.—В твердых телах и жидкостях. —Изготовление дробы. —Капиллярное притяжение. —Укорочение веревки под воздействием влаги. —Суспензия жидкостей в капиллярных трубках. —Капиллярный сифон.—Сродство между ртутью и золотом.—Примеры сродства.—Серная кислота и вода.— Кислород и водород. —Кислород и ртуть.—Магнетизм.—Электричество и электромагнетизм.—Гравитация.—Ее закон.—Примеры.—Зависит от массы.—Притяжение между Землей и отдельными телами на ее поверхности.—Вес.—Гравитация Земли.— Иллюстрируется с помощью снарядов. —Отвес. —Эксперименты Кавендиша.

[63](#)

ГЛАВА VII.

ЗЕМНАЯ ГРАВИТАЦИЯ.

Явления падающих тел. — Сила тяжести на полюсах больше, чем на экваторе. — Тяжелые и легкие тела падают на Землю с одинаковой скоростью.— Эксперимент. — Увеличение скорости падающих тел. — Принципы равномерно ускоренного движения. — Соотношение между высотой, временем и скоростью. — Машина Этвуда. — Замедленное движение.

[84](#)

ГЛАВА VIII.

О ДВИЖЕНИИ ТЕЛ ПО НАКЛОННЫМ ПЛАНИНАМ И КРИВЫМ.

Сила, перпендикулярная плоскости. — Косая сила. — Наклонная плоскость. — Вес создает

[85](#)

давление и движение. — Равномерно ускоренное движение.—Пространство, пройденное за данное время.—Увеличение высоты вызывает увеличение силы.—Перпендикулярная и горизонтальная плоскости.—Конечная скорость.—Движение по кривой.—Зависит от скорости и кривизны. —Центробежная сила. —Круг кривизны. —Радиус кривизны. — Вращающийся стол. —Эксперименты. —Солнечная система. — Примеры центробежной силы.

ГЛАВА IX.

ЦЕНТР ТЯЖЕСТИ.

Земное притяжение — совокупное действие параллельных сил. — Единая эквивалентная сила. — Примеры. — Метод определения центра тяжести. — Линия направления. — Глобус. — Сплюснутый сфероид. — Вытянутый сфероид. — Куб. —Прямая палочка.—Плоская пластина.—Треугольная пластина.—Центр тяжести не всегда находится внутри тела.—Кольцо.—Эксперименты.—Стабильное, нестабильное и нейтральное равновесие. —Движение и положение рук и ног.—Влияние коленного сустава.—Положения танцора.—Носильщик под грузом.—Движение четвероногого животного.—Танцы на канате.—Центр тяжести двух тел, отделенных друг от друга.—Математические и экспериментальные примеры. —Сохранение движения центра тяжести.—Солнечная система.—Центр тяжести иногда называют центром инерции.

[107](#)

ГЛАВА X.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОСИ.

Ось. — Планеты и обычная волчок. — Колебания или вибрации. — Мгновенные и постоянные силы. — Удар. — Постоянная сила.—Вращение.—Воздействующие силы.—Свойства неподвижной оси.—Движение силы вокруг оси.—Рычаг силы.—Импульс, перпендикулярный оси, но не пересекающий ее. —Радиус вращения. —Центр вращения. —Момент инерции. — Основные оси. —Центр удара.

[128](#)

ГЛАВА XI.

О МАЯЧКЕ.

Изохронизм. — Эксперименты. — Простой маятник. — Иллюстративные примеры. — Длина. — Эксперименты Катера, Био, Сабина и других. — Циклоидальный маятник Гюйгенса.

[145](#)

ГЛАВА XII.

О ПРОСТЫХ МАШИНАХ.

Статика. — Динамика. — Сила. — Мощность. — Вес. — Рычаг. — Вербка. — Наклонная плоскость.

[160](#)

ГЛАВА XIII.

О РЫЧАГЕ.

Рычаги. Точка опоры. Три вида рычагов. Лом. Ручной рычаг. — Весло. — Щелкунчик. — Токарный станок. — Стальные весы. — Прямоугольный рычаг. — Молоток. — Груз между двумя носильщиками. — Комбинация рычагов (). — Эквивалентный рычаг.

[167](#)

ГЛАВА XIV.

КОЛЕСА.

Колесо и ось. — Толщина веревки. — Способы применения силы. — Выступающие штифты. — Лебедка. — Винтовая лебедка. — Ось. — Горизонтальное колесо. — Беговая дорожка. — Краны. — Водяные колеса. — Лопастное колесо. — Расчетное колесо. — Зубчатая рейка. — Пружина часов. — Фузея. — Ремни или шнуры. — Примеры. — Токарный станок. — Вращающиеся валы. — Прядильные машины. — Лесопилка. — Шестерня. — Листья. — Кран. — Шпоночные колеса. — Коронные колеса. — Конические колеса. — Охотничья шестерня. — Хронометры. — Пружина. — Балансир.

[178](#)

ГЛАВА XV.

О ШКИВЕ.

Веревка. — Блок. — Неподвижный блок. — Пожарные лестницы. — Одиночный подвижный блок. — Системы блоков. — Такелаж Смитона. — Блок Уайта. — Преимущества. — Бегунок. — Испанские бартоны.

[199](#)

ГЛАВА XVI.

О НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ, КЛИНЕ И ВИНТЕ.

Наклонная плоскость. — Влияние веса на. — Сила. — Дороги. — Сила, перпендикулярная плоскости. — Плоскость иногда движется под весом. — Клин. — Иногда состоит из двух наклонных плоскостей. — Более мощный, чем его угол острый. — Где используется. — Пределы угла. — Винт. — Винт Хантера. — Примеры. — Микрометрический винт.

[209](#)

ГЛАВА XVII.

О РЕГУЛИРОВАНИИ И НАКОПЛЕНИИ СИЛЫ.

Равномерность работы. — Нерегулярность первичного двигателя. — Водяная мельница. — Ветряная мельница. — Давление пара. — Животная сила. — Пружина. — Регуляторы. —

[224](#)

Паровая машина. — Регулятор. — Самодействующий демпфер. — Тахометр.—Накопление энергии.—Примеры.—Молот.—Цепь.—Тетива.—Огнестрельное оружие.—Пневматическое оружие.—Паровое оружие.—Инертное вещество как накопитель силы.—Маховик.—Сжатый воздух.—Вальцованный металл.—Монетный пресс.

ГЛАВА XVIII.

МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ.

Разделение движения на прямолинейное и вращательное. — Непрерывное и возвратно-поступательное.—Примеры.—Текущая вода.—Ветер.—Движение животных.—Падение тела.—Шприц-насос.—Молоток.—Паровой двигатель .—Фуллинговая мельница.—Розовый двигатель.—Аппарат Зуред.—Применение его Леупольдом.—Универсальный шарнир Гука.—Круговое и попеременное движение.—Примеры.—Методы Уатта по соединению движения поршня с движением балки.—Параллельное движение.

[245](#)

ГЛАВА XIX.

О ТРЕНИ И ЖЕСТКОСТИ ВЕРЕВОК.

Трение и жесткость. — Законы трения. — Жесткость веревок. — Прочность материалов. — Сопротивление трению. — Независимость от величины поверхностей.—Примеры.—Эксперименты Винса.—Влияние скорости.—Средства уменьшения трения.—Тормозные колеса.—Угол естественного откоса.—Оптимальный угол наклона.—Железные дороги.—Жесткость канатов.

[260](#)

ГЛАВА XX.

О ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ.

Сложность определения законов, регулирующих прочность материалов. — Силы, стремящиеся разделить части твердого тела.— Законы, по которым твердые тела сопротивляются сжатию (). — Теория Эйлера. — Поперечная прочность твердых тел. — Прочность, уменьшающаяся с увеличением высоты. — Боковое или поперечное напряжение. — Пределы величины. — Относительная прочность мелких животных выше, чем у крупных.

[272](#)

ГЛАВА XXI.

О ВЕСАХ И МАЯЧКАХ.

Вес. — Время. — Весы. — Точка опоры. — Центр тяжести. — Чувствительность. — Положения точки опоры.—Балка различной конструкции.—Весы Трафтона.—Весы Робинсона.—Весы Катера.—Метод настройки весов.—Их использование.—Необходимые меры предосторожности.—Весы.—Регулировка.—Весы доктора Блэка.—Стальные весы.—Римские весы или стальные весы.—Удобство.—Стальные весы Ч. Пола.—Китайские стальные весы.—

[278](#)

Датские весы.—Весы с изогнутым рычагом.—Весы Брэди.—Весовая машина для платных дорог.—Приборы для взвешивания с помощью пружины.—Пружинные весы.—Пружинные весы Солтера.—Весовая машина с циферблатом Мэриотта.—Динамометр.—Компенсационные маятники.—Маятник Бартона с решеткой.—Таблица линейного расширения.—Вторая таблица.—Маятник Харрисона.—Маятник Трафтона.—Маятник Бензенберга.—Компенсационный маятник Уорда.—Компенсационная трубка Жюльена ле Руа.—Компенсация Депарсье.—Маятник Катера.—Маятник Рида.—Маятник Элликотта.—Ртутный маятник.—Маятник Грэма.—Компенсационный маятник из дерева и свинца.—Маятник Смитона.—Способ регулировки Брауна.

ЭЛЕМЕНТЫ

ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАНИКИ.

ГЛАВА I.

СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА — ВЕЛИЧИНА — НЕВЗАБОТЛИВОСТЬ — ФОРМА — СИЛА.

(1.) Находясь в материальном мире, человек постоянно подвергается воздействию бесконечного множества окружающих его объектов. Тело, в котором объединены мыслительные и жизненные принципы, представляет собой изысканно сконструированный аппарат, предназначенный для приема и передачи впечатлений. Его различные части организованы с очевидной ориентацией на несколько внешних агентов, под воздействием которых оно должно действовать. Каждый орган предназначен для передачи разуму немедленного сообщения о каком-либо особом действии и, соответственно, наделен соответствующей восприимчивостью. Эта адаптация таких органов к конкретным воздействиям материальных агентов становится еще более заметной, если учесть, что, каким бы тонким ни было его строение, каждый орган совершенно невосприимчив ко всем воздействиям, кроме тех, для которых он, по-видимому, специально предназначен. Глаз, столь чувствительный к воздействию света, совершенно не реагирует на звуки, в то время как тонкий механизм уха, столь чувствительный к любому воздействию последних, совершенно невосприимчив к первым. Яркий свет может вызвать слепоту, а грохот пушечного огня — глухоту, но ни зрение, ни слух не могут быть повреждены самым экстремальным воздействием того принципа, который предназначен для воздействия на другой орган.

Таким образом, органы чувств являются инструментами, с помощью которых ум может определять существование и качества внешних вещей. Воздействия, которые эти объекты оказывают на ум через органы чувств, называются *ощущениями*, и эти ощущения являются непосредственными элементами всего человеческого знания. МАТЕРИЯ — это общее название, данное той субстанции, которая в бесконечно разнообразных формах воздействует на чувства. Метафизики расходятся в определении этого принципа. Некоторые даже сомневаются в его существовании. Но эти дискуссии выходят за рамки механической философии, на выводы которой они никак не влияют. Наши исследования здесь относятся не к материи как абстрактному существованию, а к тем качествам, которые мы обнаруживаем в ней с помощью органов чувств и в существовании которых мы уверены, как бы ни решался вопрос о самой материи. Когда мы говорим о «телах», мы имеем в виду те вещи, какими бы они ни были, которые вызывают в нашем уме определенные ощущения; а способности вызывать эти ощущения называются «свойствами» или «качествами».

(2.) Установление свойств тел путем наблюдения — это первый шаг к получению знаний о природе. Таким образом, человек становится естествоиспытателем в тот момент, когда он начинает чувствовать и воспринимать. Первый этап жизни — это состояние постоянного и любопытного возбуждения. Наблюдательность и внимание, всегда бодрствующие, заняты чередой новых и удивительных объектов. Открывается огромное хранилище памяти, и каждый час в него вливается безграничное количество фактов и явлений природы, богатый материал для будущих знаний. Острый аппетит к открытиям, заложенный в уме для достижения высших целей, постоянно стимулируемый присутствием нового, притупляет все другие способности, а силы размышления и сравнения теряются в непрекращающейся

активности и неиссякаемой энергии наблюдения. Однако через некоторое время более обычные классы явлений перестают возбуждать своей новизной. Внимание переключается с открытия нового на изучение знакомого. От внешнего мира ум обращается к самому себе, и лихорадочное удивление детства уступает место более спокойному созерцанию начинающейся зрелости. Обширная и разнородная масса явлений, накопленных прошлым опытом, подвергается пересмотру. Начинается великая работа сравнения. Память производит свои запасы, а разум их упорядочивает. Затем следуют первые попытки обобщения, которые знаменуют зарождение науки в уме.

Сравнивать, классифицировать, обобщать – это, по-видимому, инстинктивные склонности, присущие человеку. Они отделяют его от низших животных широкой пропастью. Именно к этим способностям можно отнести все высшие умственные качества, и именно от их правильного применения зависит весь прогресс в науке. Без этих способностей явления природы оставались бы беспорядочной кучей сырых фактов, которые могли бы загружать память, но из которых интеллект не извлек бы никакой пользы. Сравнение и обобщение — это великие пищеварительные органы ума, с помощью которых можно извлечь питание из этой массы интеллектуальной пищи, и без которых даже самые обширные наблюдения и самое неустанное внимание не могут привести к реальному или полезному прогрессу в знании.

(3.) При рассмотрении тех свойств тел, которые чаще всего представляют нам органы чувств, мы замечаем, что очень немногие из них являются существенными и неотделимыми от материи. Большинство из них можно назвать *частными* или *особыми качествами*, которые встречаются в одних телах, но отсутствуют в других. Так, свойство притягивать железо свойственно магнитному камню и не наблюдается в других веществах. Одно тело вызывает ощущение зеленого цвета, другое — красного, а третье лишено всякого цвета. Однако некоторые характерные и существенные качества неотделимы от материи в любом состоянии или в любой форме, в которой она существует. Только такие свойства могут считаться критериями материальности. Там, где их наличие не проявляется ни в чувствах, ни в разуме, материи нет. Основными из этих качеств являются *величина* и *непроницаемость*.

(4.) *Величина*. — Каждое тело занимает пространство, то есть имеет величину. Это свойство, наблюдаемое чувствами во всех телах, которые не настолько малы, чтобы ускользнуть от них, и которое понимание может проследить до самой маленькой частицы материи. Невозможно даже представить себе, при каком бы то ни было напряжении воображения, часть материи, настолько малую, что она не имеет величины.

Количество пространства, которое занимает тело, иногда называют его *величиной*. В разговорной фразеологии для выражения этого понятия используется слово «размер», но наиболее правильным термином, который мы будем обычно использовать, является «объем». Так, мы говорим, что объем Земли составляет столько-то кубических миль, а объем этой комнаты — столько-то кубических футов.

Внешними границами величины тела являются *линии* и *поверхности*, причем линии являются границами, разделяющими несколько поверхностей одного и того же тела. Линейные границы тела также называются *краями*. Так, линия, разделяющая верхнюю часть сундука от одной из его боковых сторон, называется краем.

Количество поверхности называется ее *площадью*, а *количество* линии называется ее *длиной*. Так, мы говорим, что *площадь* поля составляет столько-то акров, а *длина* веревки составляет столько-то ярдов. Однако слово «величина» часто используется без разбора для обозначения объема, площади и длины. Если бы объекты исследования были более сложными и тонкими, как в метафизике, такое нестабильное применение терминов могло бы привести к путанице и даже к ошибкам; но в этой науке значение термина очевидно из того, как он применяется, и никаких неудобств не возникает.

(5.) *Непроницаемость*. — Это свойство можно наиболее ясно объяснить, определив положительное качество, от которого оно получает свое название и которое оно просто обозначает как отсутствие. Вещество было бы *проницаемым*, если бы оно позволяло другому проходить через занимаемое им пространство, не нарушая его составных частей. Таким образом, если комета, ударившаяся о Землю, могла бы войти в нее с одной стороны, пройти через нее и выйти с другой, не разделив и не нарушив никаких тел на Земле или внутри нее, то Земля была бы проницаема для кометы. Когда говорят, что тела непроницаемы, это означает, что одно тело не может пройти через другое, не сместив некоторые или все составные части этого другого тела. Есть много примеров кажущегося проникновения, но во всех этих случаях части тела, которые кажутся проникнутыми, смещаются. Так, если острие иглы погрузить в сосуд с водой, вся вода, которая ранее заполняла пространство, в которое входит игла, будет смещена, и уровень воды в сосуде поднимется на ту же высоту, что и при добавлении такого количества воды, которое заполнило бы пространство, занимаемое иглой.

(6.) *Фигура*. — Если положить руку на твердое тело, мы ощущаем его непроницаемость по препятствию, которое оно создает для проникновения руки в его объем. Мы также ощущаем, что это препятствие начинается в определенных местах, что оно имеет определенные границы, что эти границы расположены в определенных направлениях относительно друг друга. Взаимосвязь, которая существует между этими границами тела, дает нам представление о его *фигуре*. *Фигура* и *объем* тела следует тщательно различать. Каждое из них полностью независимо от другого. Тела, имеющие очень разные *объемы*, могут иметь одинаковую *фигуру*; и точно так же тела, различающиеся по *фигуре*, могут иметь одинаковый *объем*. Фигура тела — это то, что в просторечии называется его *формой*. Объем тела — это то, что обычно называют его *размером*. Таким образом, легко понять, что одно тело (например, глобус) может иметь в десять раз больший объем, чем другое (глобус), и при этом иметь ту же форму; и что два тела (например, кубик и глобус) могут иметь совершенно разные *формы* (), но при этом иметь одинаковый *объем*. То, что мы здесь наблюдали в отношении объемов, применимо также к длинам и площадям. Дуга окружности и прямая линия могут иметь одинаковую длину, хотя и имеют разные фигуры; и, с другой стороны, две дуги разных окружностей могут иметь одинаковую фигуру, но очень неравные длины. Поверхность шара изогнута, а поверхность стола плоская; и все же *площадь* поверхности шара может быть равна площади стола.

(7.) *Атомы — молекулы*. Непроницаемость не следует путать с неразделимостью. Любое тело, которое подвергалось наблюдению человека, можно разделить на части, и эти части, какими бы маленькими они ни были, можно разделить на другие, еще более мелкие. Практического предела этому процессу деления найдено не было. Тем не менее, многие явления, открытые в ходе исследований тех, кто успешно изучал законы природы, делают

весьма вероятным, что все тела состоят из элементарных частей, которые неделимы и неизменны. Составляющие части, которые можно назвать *атомами*, настолько малы, что их невозможно уловить чувствами, даже с помощью самых мощных научных инструментов. Слово «*молекула*» часто используется для обозначения составных частей тела, которые настолько малы, что ускользают от восприятия, но не являются конечными атомами, поскольку каждая молекула, как предполагается, состоит из нескольких атомов, расположенных в соответствии с определенной фигурой. Слово «*частица*» также используется для обозначения мелких составных частей, но чаще всего применяется к тем, которые не слишком малы, чтобы их можно было обнаружить с помощью наблюдения.

(8.) *Сила*. — Если бы частицы материи не обладали никакими свойствами по отношению друг к другу, кроме взаимной непроницаемости, вселенная была бы похожа на массу песка, без разнообразия состояний и форм. Атомы, помещенные рядом, не сцеплялись бы, как в твердых телах, и не отталкивали бы друг друга, как в газообразных веществах. Напротив, мы видим, что в некоторых случаях атомы, составляющие тела, не просто соприкасаются, но проявляют определенный эффект в виде сильной когерентности (). Если бы они просто соприкасались, их разделение было бы столь же легким, как и перемещение любого из них из одного места в другое. Возьмите кусок железа и попытайтесь разделить его части: это будет сопровождаться сильным сопротивлением, и гораздо проще будет переместить всю массу целиком. Таким образом, в таких случаях части, расположенные рядом, *сцепляются* и сопротивляются взаимному разделению. Этот эффект называется *силой*; и говорят, что составляющие атомы когерентны с большей или меньшей степенью силы, в зависимости от того, оказывают ли они большее или меньшее сопротивление своему взаимному разделению.

Сцепление соседних частиц является эффектом того же класса, что и взаимное приближение частиц, расположенных на расстоянии друг от друга. Несложно понять, что то же влияние, которое заставляет тела А и В приближаться друг к другу, когда они находятся на некотором расстоянии друг от друга, будет, когда они соединятся, удерживать их вместе и оказывать сопротивление их разделению. Поэтому этот эффект взаимного приближения тел друг к другу также называется *силой*.

Сила обычно определяется как «все, что вызывает или противодействует движению материи». В этом смысле это название неизвестной причины известного эффекта. Однако было бы более философским дать название не *причине*, о которой мы ничего не знаем, а *эффекту*, о котором у нас есть очевидные доказательства. Наблюдать и классифицировать — вот и все дело естествоиспытателя. Когда речь идет о *причинах*, подразумевается, что эффекты одного и того же класса возникают под воздействием одной и той же причины. Как бы вероятно ни было это предположение, оно совершенно ненужно. Все цели науки, расширение ума, расширение и совершенствование знаний, облегчение их приобретения, достигаются только путем обобщения, и ничего хорошего не может выйти из того, что мы заражаем наши выводы возможными ошибками гипотез.

Здесь можно раз и навсегда заметить, что терминология причинности и гипотез настолько переплелась с языком науки, что невозможно избежать ее частого использования. Так, мы говорим: «магнит *притягивает* железо», где выражение «*притягивает*» указывает на причину наблюдаемого эффекта. Однако в таких случаях мы должны понимать, что имеем в

виду *сам эффект*, поскольку считаем менее неудобным продолжать использовать принятые выражения, изменяя их значение, чем вводить новые.

Сила, проявляющаяся в взаимном приближении или сцеплении тел, также называется *притяжением* и имеет различные названия в зависимости от обстоятельств, при которых она наблюдается. Так, сила, удерживающая атомы твердых тел, называется *когезионным притяжением*. Сила, которая притягивает тела к поверхности Земли, когда они находятся над ней, называется *силой притяжения*. Сила, проявляющаяся при взаимном приближении или сцеплении магнита и железа, называется *магнитным притяжением*, и так далее.

Когда сила проявляется в движении тел друг от друга, она называется *отталкиванием*. Так, если кусок стекла, энергично потёртый шелковым платком, последовательно коснуться двух перьев, то эти перья, если их приблизить друг к другу, будут отталкиваться. Этот эффект называется *отталкиванием*, и говорят, что перья *отталкивают* друг друга.

(9.) Влияние, которое силы оказывают на форму, состояние, расположение и движения материальных веществ, является основным предметом физической науки. В строгом смысле МЕХАНИКА — это термин с очень широким значением. Однако в более популярном употреблении он обычно применяется к той части физической науки, которая включает в себя исследование явлений движения и покоя, давления и других эффектов, возникающих в результате взаимного действия твердых масс. Рассмотрение аналогичных явлений, проявляющихся в жидких телах, относится к ГИДРОСТАТИКЕ, а рассмотрение явлений, связанных с газообразными жидкостями, — к ПНЕВМАТИКЕ.

ГЛАВА II.

ДЕЛЕННОСТЬ — ПОРОЗОСТЬ — ПЛОТНОСТЬ — СЖИМАЕМОСТЬ — ЭЛАСТИЧНОСТЬ —
РАСТЯЖИМОСТЬ.

(10.) Помимо свойств величины и непроницаемости, в механической философии рассматривается еще несколько общих свойств тел, к которым мы будем часто обращаться. В настоящей главе мы рассмотрим следующие из них

1.			Делимость.
2.	Пористость	—	плотность.
3.	Сжимаемость	—	Эластичность.
4.			Растяжимость.

(11.) *Делимость.* — Наблюдения и опыт доказывают, что все тела заметных размеров, даже самые твердые, состоят из частей, которые можно разделить. Практическому делению материи, по-видимому, нет предела. Многочисленные примеры деления материи до степени, почти превосходящей всякое воображение, можно найти в экспериментальных исследованиях, проводимых в физической науке; полезные искусства предоставляют не менее поразительные примеры; но, пожалуй, самые яркие доказательства крайней мелкости частей материи, которые можно привести, возникают из рассмотрения определенных частей организованного мира.

(12.) Относительное расположение звезд на небе, видимое в поле зрения телескопа, отмечается тонкими проволочными линиями, расположенными перед окуляром и пересекающимися под прямым углом. Поскольку звезды в телескопе видны как простые светящиеся точки без заметной величины, проволоки, отмечающие их положение, должны иметь соответствующую тонкость. Однако эти проволоки, увеличенные окуляром, будут иметь видимую толщину, что сделает их непригодными для этой цели, если только их реальные размеры не будут чрезвычайно малы. Чтобы получить проволоку для этой цели, доктор Волластон изобрел следующий процесс : кусок тонкой платиновой проволоки a b протягивается вдоль оси цилиндрической формы A B , [рис. 1.](#) В эту форму в точке A заливается расплавленное серебро. Поскольку тепло, необходимое для плавления платины, намного выше, чем тепло, необходимое для поддержания серебра в жидком состоянии, проволока a b остается твердой, в то время как форма A B заполняется серебром. Когда металл остывает и становится твердым, его извлекают из формы, получая цилиндрический слиток серебра с платиновой проволокой в оси. Затем этот слиток волочится, пропуская его последовательно через отверстия C , D , E , F , G , H , уменьшающиеся по размеру, причем первое отверстие немного меньше, чем проволока в начале процесса. Таким образом, платина a b вытягивается одновременно и в той же пропорции, что и серебро, так что какова бы ни была исходная пропорция толщины проволоки a b по отношению к толщине формы A B , такая же будет пропорция платиновой проволоки по отношению к общей толщине в нескольких

точках C, D и т. д. Если предположить, что толщина формы A B в десять раз превышает толщину проволоки a b , то серебряная проволока на протяжении всего процесса будет в десять раз толще платиновой проволоки, которая находится внутри нее. Серебряная проволока может быть вытянута до толщины, не превышающей 300-й доли дюйма. Таким образом, толщина платины не превысит 3000-й доли дюйма. Затем проволока погружается в азотную кислоту, которая растворяет серебро, но оставляет платину в твердом состоянии. С помощью этого метода доктор Волластон удалось получить проволоку, диаметр которой не превышал 18000-й доли дюйма. Количество этой проволоки, равное по объему обычной кости, используемой в азартных играх, протянулось бы от Парижа до Рима.

(13.) Ньюто́ну удалось определить толщину очень тонких пластин прозрачных веществ, наблюдая цвета, которые они отражают. Мыльный пузырь представляет собой тонкую оболочку из воды, которая, как можно заметить, отражает разные цвета с разных частей своей поверхности. Непосредственно перед тем, как пузырь лопается, в его верхней части можно заметить черное пятно. Было доказано, что в этой части толщина не превышает 2 500 000-й доли дюйма ().

Прозрачные крылья некоторых насекомых настолько тонкие, что 50 000 из них, сложенных друг на друга, не образуют стопки высотой даже в четверть дюйма.

(14.) При изготовлении вышивки необходимо получить очень тонкие позолоченные серебряные нити. Для этого цилиндрический слиток серебра весом 360 унций покрывают примерно двумя унциями золота. Затем этот позолоченный слиток, как и в первом примере, тянут, пока он не превратится в нить, настолько тонкую, что 3400 футов ее весят менее одной унции. Затем проволока сплющивается путем пропускания между валками под сильным давлением, что увеличивает ее длину, так что около 4000 футов весят одну унцию. Следовательно, один фут весит 4000-ю часть унции. Соотношение золота и серебра в исходном слитке составляло 2 к 360 или 1 к 180. Поскольку это соотношение сохраняется после волочения слитка, следует, что количество золота, покрывающее один фут тонкой проволоки, составляет 180-ю часть от 4000-й части унции, то есть 720 000-ю часть унции.

Количество золота, покрывающее один дюйм этой проволоки, будет в двенадцать раз меньше, чем количество, покрывающее один фут. Следовательно, это количество будет составлять 8 640 000-ю часть унции. Если этот дюйм снова разделить на 100 равных частей, каждая часть будет отчетливо видна без помощи микроскопа. Золото, покрывающее эту маленькую, но видимую часть, составляет 864 000 000-ю часть унции. Но мы можем пойти еще дальше; эту часть проволоки можно рассмотреть с помощью микроскопа, увеличивающего в 500 раз, так что 500-я часть ее станет видимой. Таким образом, унция золота может быть разделена на 432 000 000 000 видимых частей, каждая из которых будет обладать всеми характеристиками и качествами, присущими крупнейшим массам этого металла. Она сохранит свою прочность, текстуру и цвет, будет противостоять тем же воздействиям и вступать в соединение с теми же веществами. Если позолоченную проволоку окунуть в азотную кислоту, серебро внутри покрытия растворится, но полая трубка из золота, окружавшая его, останется цельной и будет висеть в воздухе.

(15.) Организованный мир предлагает еще более замечательные примеры невообразимой тонкости материи.

Кровь, которая течет по венам животных, не является, как кажется, однородной красной жидкостью. Она состоит из плоских дисков красного цвета, плавающих в прозрачной жидкости, называемой *сывороткой*. У разных видов эти диски различаются как по форме, так и по размеру. У человека и всех животных, которые вскармливают своих детенышей, они имеют идеально круглую или почти круглую форму. У птиц, рептилий и рыб они имеют овальную форму. У человека диаметр этих дисков составляет около 3500-й доли дюйма. Отсюда следует, что в капле крови, которая осталась бы висеть на конце тонкой иглы, должно быть около 3 000 000 таких дисков.

Несмотря на то, что эти диски очень малы, в животном мире есть существа, чьи тела еще меньше. Были обнаружены микроорганизмы, размер которых таков, что миллион из них не превышает объема песчинки; и все же каждое из этих существ состоит из частей, организованных так же любопытно, как и у самых крупных видов; они обладают жизнью и спонтанным движением, а также наделены чувствами и инстинктами. В жидкостях, в которых они живут, они двигаются с удивительной скоростью и активностью; их движения не являются слепыми и случайными, а явно управляются выбором и направлены на достижение цели. Они употребляют пищу и питье, из которых получают питание, и поэтому снабжены пищеварительным аппаратом. Они обладают большой мышечной силой и снабжены конечностями и мышцами, отличающимися силой и гибкостью. Они подвержены тем же аппетитам и тем же страстям, удовлетворение которых сопровождается теми же результатами, что и у нашего вида. Спалланцани замечает, что некоторые микроорганизмы пожирают других с такой жадностью, что от переедания они толстеют, становятся ленивыми и вялыми. После такого рода трапезы, если их поместить в дистиллированную воду, лишив их всякой пищи, их состояние ухудшается; они восстанавливают свою энергию и активность и развлекаются преследованием более мелких животных, которые им поставляются; они проглатывают их, не лишая их жизни, поскольку с помощью микроскопа было замечено, что одни из них двигаются внутри тела других. Эти необычные явления не являются предметом праздного и любопытного наблюдения. Они заставляют нас задаться вопросом, какие части необходимы для получения таких результатов. Не должны ли мы прийти к выводу, что эти существа имеют сердце, артерии, вены, мышцы, сухожилия, нервы, циркулирующие жидкости и все сопутствующие аппараты живого организованного тела? И если да, то насколько невообразимо крошечными должны быть эти части! Если капля их крови имеет такое же соотношение к их общему объему, как капля нашей крови к нашему размеру, то какие вычислительные способности могут дать адекватное представление о ее крошечности?

(16.) Эти и многие другие явления, наблюдаемые в непосредственных продуктах природы или развивающиеся в результате механических и химических процессов, доказывают, что материалы, из которых состоят тела, могут быть настолько мелкими, что бесконечно превосходят возможности чувственного наблюдения, даже когда эти возможности расширены с помощью всех средств науки. Должны ли мы тогда сделать вывод, что материя бесконечно делима и что не существует исходных атомов определенной величины и формы, на которых все деление должно прекратиться? Такой вывод был бы необоснованным, даже если бы у нас не было других средств для решения этого вопроса, кроме непосредственного наблюдения, поскольку это означало бы наложение на произведения природы того ограничения, которое она наложила на наши способности их наблюдать. Однако с помощью разума и должного рассмотрения определенных явлений, которые находятся в пределах

наших непосредственных возможностей наблюдения, мы часто можем определять другие явления, которые выходят за пределы этих возможностей. Мы не воспринимаем суточное движение Земли, потому что все вокруг нас участвует в нем, сохраняет свое относительное положение и кажется находящимся в состоянии покоя (). Но разум подсказывает нам, что такое движение должно вызывать смену дня и ночи, восход и закат всех небесных тел — явления, которые легко наблюдаются и выдают причину, из которой они возникают. Опять же, мы не можем удалиться от Земли и увидеть ось, вокруг которой она вращается, и наблюдать ее особую наклонность к орбите, по которой движется Земля; но мы видим и чувствуем смену времен года, эффект, который является непосредственным следствием этого наклона и благодаря которому мы можем его обнаружить.

(17.) То же самое и в данном случае. Хотя мы не можем прямым наблюдением доказать существование материальных атомов определенной формы, тем не менее существует много наблюдаемых явлений, которые делают их существование в высшей степени вероятным, если не морально определенным. Наиболее замечательный из этой категории эффектов наблюдается при кристаллизации солей. Когда соль растворяется в достаточном количестве чистой воды, она смешивается с водой таким образом, что полностью исчезает из поля зрения и на ощупь, а смесь становится однородной прозрачной жидкостью, подобной самой воде до ее соединения с солью. Однако присутствие соли в воде можно подтвердить, взвесив смесь, которая будет превышать исходный вес воды на точное количество веса соли. Хорошо известно, что при определенной температуре вода превращается в пар, и что та же температура не оказывает такого же воздействия на соль. При воздействии этой температуры на смесь соли и воды вода постепенно испаряется, отделяясь от соли, с которой она была соединена. Когда испарится столько воды, что оставшейся ее количества будет недостаточно для поддержания растворения всей соли, часть соли, таким образом отделенная от воды, вернется в твердое состояние. В этом случае солевой компонент не будет собираться в нерегулярные твердые молекулы, а будет проявляться в виде частиц правильной формы, ограниченных плоскими поверхностями, причем форма будет всегда одинаковой для одного и того же вида соли, но различной для разных видов. Эти частицы называются *кристаллами*. При образовании этих *кристаллов* следует обратить внимание на несколько обстоятельств.

Если одну из них отделить от остальных и наблюдать за процессом ее образования, то можно будет заметить, что она постепенно увеличивается, всегда сохраняя свою первоначальную форму. Поскольку ее увеличение должно быть вызвано постоянным присоединением молекул соли, высвобождающихся при испарении воды, из этого следует, что эти молекулы должны быть сформированы таким образом, что, присоединяясь последовательно к кристаллу, они сохраняют регулярность его граничных плоскостей и сохраняют неизменными свои взаимные наклоны.

Предположим, что кристалл извлекается из жидкости в процессе кристаллизации, и от него отламывается кусок, разрушающий регулярность его формы: если такой отламанный кристалл вернуть в жидкость, то будет замечено, что он постепенно восстанавливает свою регулярную форму, а атомы соли, последовательно высвобождаемые испаряющейся водой, заполняют нерегулярные полости, образовавшиеся в результате отламывания. Отсюда следует, что солевые частицы, составляющие поверхность кристалла, и те, которые

образуют внутреннюю часть его массы, являются схожими и оказывают сходное притяжение на атомы, высвобождаемые водой.

Все эти детали процесса кристаллизации являются очень очевидными признаками определенной формы конечных атомов веществ, которые кристаллизуются. Но помимо веществ, которые таким образом искусственно приводятся в форму кристаллов, существуют более крупные классы, которые естественным образом существуют в таком состоянии. Существуют определенные плоскости, называемые *плоскостями спайности*, по направлению которых природные кристаллы легко разделяются. Эти плоскости в веществах одного и того же вида всегда имеют одинаковое относительное положение, но различаются в разных веществах. Поверхности плоскостей спайности совершенно невидимы до разделения кристалла, но когда части разделены, эти поверхности демонстрируют наиболее интенсивную полировку, которой не может сравниться никакое искусство.

Мы можем представить себе кристаллизованные вещества как регулярные механические структуры, образованные атомами определенной формы (), от которой зависит форма всей структуры. Плоскости спайности параллельны сторонам составляющих атомов; и их направления, таким образом, образуют множество условий для определения их фигуры. Поскольку форма атомов таким образом определена, нетрудно присвоить все различные способы их расположения, чтобы получить фигуры, которые соответствуют различным формам кристаллов одного и того же вещества.

(18.) Когда эти явления должным образом рассмотрены и сопоставлены, не остается сомнений в том, что все вещества, способные к кристаллизации, состоят из атомов определенной формы. Это относится ко всем твердым телам, которые были подвергнуты научному наблюдению, поскольку они были обнаружены в кристаллизованной форме или приведены к ней. Жидкости кристаллизуются при замерзании, и если бы газообразные жидкости могли каким-либо образом быть сведены к твердой форме, они, вероятно, также проявили бы тот же эффект. Следовательно, представляется разумным предположить, что все тела состоят из атомов; что различные качества, которыми обладают различные вещества, зависят от величины и формы этих атомов; что эти атомы неразрушимы и неизменны в результате каких-либо естественных процессов, поскольку мы обнаруживаем, что свойства, зависящие от них, остаются неизменными при всех воздействиях, которым они подвергались с момента своего создания; что эти атомы настолько малы по размеру, что их невозможно наблюдать с помощью каких-либо средств, изобретенных человеком, но все же можно определить размеры, которые они не превышают.

Однако здесь следует отметить, что различные теоремы механической науки не основываются на каких-либо гипотезах относительно этих атомов. Эти теоремы не выводятся из этого или какого-либо другого предположения, и поэтому их истинность не будет никоим образом нарушена, даже если будет установлено, что материя физически делима *до бесконечности*. Основой механической науки являются *наблюдаемые факты*, и, поскольку рассуждения носят демонстративный характер, выводы имеют ту же степень достоверности, что и факты, из которых они выводятся.

(19.) *Пористость*. Объем тела — это количество пространства, заключенного между его внешними поверхностями. Масса тела — это совокупность атомов или материальных частиц, из которых оно состоит. Два атома или частицы считаются соприкасающимися,

когда они приблизились друг к другу до тех пор, пока их взаимная непроницаемость не остановила их движение. Если бы составляющие частицы тела соприкасались, *объем* был бы полностью занят *массой*. Но это не так. Мы сейчас докажем, что составляющие частицы ни одного известного вещества не находятся в абсолютном контакте. Отсюда следует, что объем состоит частично из материальных частиц, а частично из межклеточных пространств, которые либо абсолютно пустые, либо заполнены каким-либо веществом, отличным от рассматриваемого тела. Эти межклеточные пространства называются *порами*.

В телах, которые имеют однородную структуру по всем своим размерам, составляющие частицы и поры равномерно распределены по всему объему; то есть данное пространство в одной части объема будет содержать такое же количество вещества и такое же количество пор, как и равное ему пространство в другой части.

(20.) Отношение количества вещества к величине называется *плотностью*. Таким образом, если из двух веществ одно содержит в данном пространстве в два раза больше вещества, чем другое, то оно считается «в два раза более плотным». Плотность тел, следовательно, пропорциональна плотности или близости их частиц; и очевидно, что чем больше плотность, тем меньше пористость.

Поры тела часто заполнены другим телом более тонкой природы. Если поры тела на поверхности земли, подверженного воздействию атмосферы, больше атомов воздуха, то воздух может проникать в поры. Это наблюдается у многих видов дерева с открытыми порами. Если кусок такой древесины, мела или сахара прижать к дну сосуда с водой, то можно наблюдать, как воздух, заполняющий поры, выходит в виде пузырьков и поднимается на поверхность, а вода проникает в поры и занимает его место.

Если высокий сосуд или трубка с деревянным дном наполнить ртутью, жидкий металл под собственным весом будет проникать через поры дерева и вытекать из дна серебряным дождем.

(21.) Процесс фильтрации в технике зависит от наличия пор такого размера, которые пропускают жидкость, но задерживают примеси, от которых она должна быть очищена. В качестве фильтров используются различные вещества, но, независимо от того, что используется, всегда следует помнить, что никакое вещество не может быть отделено от жидкости путем фильтрации, за исключением тех, частицы которых больше, чем частицы жидкости. В общем случае фильтры используются для отделения *твердых* примесей от жидкости. Наиболее распространенными фильтрами являются мягкий камень, бумага и древесный уголь.

(22.) Все органические вещества в животном и растительном царствах по своей природе являются в высокой степени пористыми. Минералы являются пористыми в разной степени. Среди кремнистых камней есть один, называемый *гидрофаном*, который проявляет свою пористость очень замечательным образом. В обычном состоянии этот камень полупрозрачен. Однако если его погрузить в воду, то после извлечения он становится прозрачным, как стекло. В этом случае поры, ранее заполненные воздухом, проникают водой, между которой и камнем существует физическая связь, благодаря которой одно делает другое совершенно прозрачным.

Более крупные минеральные массы демонстрируют не менее поразительную пористость. Вода просачивается через стены и потолки пещер и гротов, пропитываясь известковыми и

другими землями, и образует сталактиты, или свисающие выступы, которые имеют любопытный вид.

(23.) *Сжимаемость*. — Свойство, благодаря которому тело позволяет уменьшать свой объем без уменьшения массы, называется *сжимаемостью*. Этот эффект возникает в результате сближения составляющих частиц, что приводит к увеличению плотности и уменьшению пор. Этот эффект может возникать несколькими способами, но название «сжимаемость» применяется к нему только в том случае, когда он вызван действием механической силы, такой как давление или удар.

Все известные тела, независимо от их природы, способны уменьшать свои размеры без уменьшения массы, и это является одним из наиболее убедительных доказательств того, что все тела пористые или что составляющие их атомы не соприкасаются, поскольку пространство, за счет которого может уменьшаться объем, до уменьшения должно состоять из пор.

(24.) *Эластичность*. Некоторые тела, сжимаемые механическим воздействием, восстанавливают свои прежние размеры с определенной энергией, когда с них снимается сила, которая их сжимала. Это свойство называется *эластичностью*; из этого определения следует, что все эластичные тела должны быть сжимаемыми, хотя обратное неверно, поскольку сжимаемость не обязательно подразумевает эластичность.

(25.) *Расширяемость*. Это качество противоположно сжимаемости. Оно заключается в способности тел увеличивать свой объем без увеличения массы. Этот эффект может быть получен несколькими способами. В обычных условиях тело может находиться под постоянным давлением, которое определяет его объем и плотность. Может случиться так, что при временном снятии этого давления тело *расширится* благодаря свойству, присущему его структуре. Так происходит с обычным воздухом. Расширение может также быть результатом воздействия тепла, как будет показано ниже.

Несколько свойств тел, которые мы отметили в этой главе, при рассмотрении в соотношении друг с другом представляют много обстоятельств, заслуживающих внимания.

(26.) Физический закон высокой общей значимости гласит, что повышение температуры или степени нагрева, подвергающегося воздействию тело, сопровождается увеличением его объема, а понижение температуры сопровождается уменьшением объема. Исключения из этого закона будут отмечены и объяснены в нашем трактате о ТЕПЛЕ. Отсюда следует, что снижение температуры является эффектом, который, с механической точки зрения, эквивалентен сжатию или конденсации, поскольку он уменьшает объем без изменения массы; и поскольку это эффект, которому подвержены все тела, из этого следует, что все тела имеют *поры*. (23.)

Тот факт, что повышение температуры приводит к увеличению объема, подтверждается многочисленными экспериментами.

(27.) Если мягкий пузырь завязать у отверстия, чтобы предотвратить выход воздуха, а затем подержать его перед огнем, он постепенно раздуется и примет вид полностью наполненного. Небольшое количество воздуха, содержащееся в пузыре, в этом случае настолько расширяется под воздействием тепла, что занимает значительно большее пространство и заполняет пузырь, в котором ранее занимало лишь небольшую часть. Когда

пузырь убирают с огня и дают ему вернуться к прежней температуре, воздух возвращается к прежним размерам, и пузырь снова становится вялым.

(28.) Пусть А В, [рис. 2](#), будет стеклянной трубкой с шариком на конце А; пусть шарик А и часть трубки заполнены любой жидкостью, окрашенной так, чтобы быть видимой. Пусть С — уровень жидкости в трубке. Если теперь шарик подвергнуть нагреванию, погрузив его в горячую воду, уровень жидкости С быстро поднимется к В. Этот эффект возникает в результате расширения жидкости в шарике, которая, заполняя большее пространство, частично вытесняется в трубку. Этот эксперимент можно легко провести с помощью обычной стеклянной трубки и небольшого количества портвейна.

Термометры построены по этому принципу, причем подъем жидкости в трубке используется в качестве индикатора степени тепла, вызывающего его. Подробное описание этих полезных приборов можно найти в нашем трактате о ТЕПЛЕ.

(29.) Изменение размеров твердых тел, вызванное изменениями температуры, гораздо меньше, чем у тел в жидком или газообразном состоянии, и поэтому не так легко наблюдаемо. Замечательный пример этого явления можно увидеть в процессе подковывания колес карет. Железный обод, которым обвязывается колесо, изначально изготавливается с диаметром, несколько меньшим, чем диаметр колеса, но при нагревании до очень высокой температуры его объем увеличивается настолько, что становится достаточным для охвата и обвязывания колеса. После установки на колесо он охлаждается и внезапно, сокращаясь в размерах, прочно скрепляет части колеса и надежно фиксируется на своем месте на ободе.

(30.) Часто бывает, что пробка стеклянной бутылки или графина застревает на своем месте настолько прочно, что приложение силы, достаточной для ее извлечения, может повредить сосуд. В этом случае, если приложить к горлышку бутылки ткань, смоченную горячей водой, стекло расширится, и горлышко увеличится, что позволит легко извлечь пробку.

(31.) Сокращение металла в результате изменения температуры было некоторое время назад применено в Париже для восстановления стен шаткого здания в их надлежащем положении. В *Консерватории искусств и ремесел* стены части здания были вытеснены из перпендикулярного положения весом крыши, так что каждая стена наклонялась наружу. М. Молар придумал применить непреодолимую силу, с которой металлы сжимаются при охлаждении, чтобы сблизить стены. Железные стержни были размещены параллельно поперек здания и под прямым углом к направлению стен. Прорезав их через стены, на их концы снаружи здания были навинчены гайки. Затем каждая вторая балка была нагрета лампами, и гайки были завинчены близко к стенам. Затем балки были охлаждены, и их длина уменьшилась в результате сжатия, гайки на их концах были сдвинуты вместе, и вместе с ними стены были сдвинуты на равное расстояние. Тот же процесс был повторен с промежуточными балками и так далее поочередно, пока стены не были приведены в вертикальное положение.

(32.) Поскольку во всех телах на поверхности земного шара происходит постоянное изменение температуры, из этого следует, что происходит также постоянное изменение величины. Вещества, которые нас окружают, постоянно расширяются и сжимаются под воздействием перемен теплоты и холода. Зимой они становятся меньше, а летом расширяются. В теплый день они увеличивают свой объем, а в холодный — сжимаются. Эти

любопытные явления не замечаются только потому, что наши обычные средства наблюдения недостаточно точны, чтобы их оценить. Тем не менее, в некоторых знакомых случаях эффект очень очевиден. В теплую погоду плоть разбухает, сосуды кажутся заполненными, руки становятся пухлыми, а кожа растягивается. В холодную погоду, когда тело подвергается воздействию открытого воздуха, плоть кажется сжимающейся, сосуды сужаются, а кожа сморщивается.

(33.) Явления, сопровождающие изменение температуры, являются убедительным доказательством всеобщей пористости материальных веществ, но они не являются единственным доказательством. Многие вещества поддаются сжатию под действием одной лишь механической силы.

Пусть небольшой кусочек пробки плавает на поверхности воды в тазу или другом сосуде, а пустой стеклянный бокал перевернут над пробкой так, чтобы его край как раз касался воды. Часть воздуха окажется заключенной в бокале и отделенной от остальной атмосферы. Если теперь надавить на бокал вниз, чтобы он полностью погрузился в воду, то можно будет наблюдать, что вода не заполнит его, поскольку ей препятствует *непроницаемость* заключенного в нем воздуха. Таким образом, этот эксперимент доказывает, что воздух, одно из самых тонких и разреженных веществ, известных нам, обладает свойством непроницаемости. Он абсолютно исключает любое другое тело из пространства, которое он занимает в данный момент.

Но хотя вода не заполняет бокал, если обратить внимание на положение пробки, плавающей на его поверхности (), то можно заметить, что уровень воды внутри поднялся () выше его края или ободка. Фактически, вода частично заполнила кубок, и воздух был вынужден сжать свои размеры. Этот эффект возникает под давлением воды, которая давит на поверхность кубка, и воздух сжимается до тех пор, пока не приобретет силу, способную противостоять этому давлению. Таким образом, оказывается, что воздух может сжиматься под механическим давлением, независимо от воздействия тепла. Он *сжимается*.

То, что этот эффект является следствием давления жидкости, легко продемонстрировать, показав, что при увеличении давления воздух пропорционально сжимается, а при его уменьшении — расширяется. Если увеличить глубину погружения бокала в воду, пробка поднимется в нем, показывая, что увеличение давления на большей глубине приводит к более сильному сжатию воздуха в бокале. Если же, наоборот, поднять бокал к поверхности, пробка опустится к краю, показывая, что по мере освобождения от давления жидкости воздух постепенно возвращается к своим первоначальным размерам.

(34.) Эти явления также доказывают, что воздух обладает свойством *упругости*. Если бы он был просто сжимаемым, а не упругим, он сохранил бы размеры, до которых был сжат давлением жидкости, но это не соответствует действительности. По мере уменьшения силы сжатия воздух, благодаря своей упругости, в той же пропорции оказывает силу, благодаря которой он восстанавливает свои прежние размеры.

То, что в предыдущих экспериментах именно воздух исключает воду из бокала, можно легко доказать. Когда бокал погружен глубоко в сосуд с водой, наклоните его немного в одну сторону, чтобы его горлышко оказалось по отношению к боковой стороне сосуда; регулируйте наклон так, чтобы поверхность воды в бокале доходила до его края. При небольшом увеличении наклона () можно будет наблюдать, как воздух выходит из бокала и

поднимается в виде пузырьков на поверхность воды. Если затем вернуть бокал в исходное положение, то пробка поднимется выше, чем до выхода воздуха. В этом случае вода поднимается и заполняет пространство, которое освободилось после ухода воздуха. Этот процесс можно повторять до тех пор, пока весь воздух не уйдет, и тогда стакан будет полностью заполнен водой.

(35.) Жидкости сжимаются под действием механической силы настолько незначительно, что во всех трактатах по гидростатике они считаются несжимаемыми жидкостями. Однако они не являются абсолютно несжимаемыми, а поддаются слабому или очень сильному давлению. Вопрос о сжимаемости жидкостей был поднят в далеком прошлом в истории науки. Почти два века назад в Академии *дель Чиммента* во Флоренции был проведен эксперимент, чтобы выяснить, сжимаема ли вода. Для этого полый золотой шар был наполнен жидкостью, а отверстие точно и плотно закрыто. Затем шар подвергли очень сильному давлению, в результате чего его форма слегка изменилась. В геометрии доказано, что шар обладает таким свойством, что любое изменение его формы обязательно приводит к уменьшению его объема или содержимого. Отсюда был сделан вывод, что если вода не вытечет через поры золота и не разорвет шар, то ее сжимаемость будет доказана. Результатом эксперимента было то, что вода просочилась через поры и покрыла поверхность шара, создав вид росы или пара, охлажденного металлом. Но этот эксперимент был неубедительным. Совершенно верно, что если бы вода не вытекла при изменении формы шара, *сжимаемость* жидкости была бы доказана. Однако утечка воды не доказывает ее *несжимаемость*. Чтобы это доказать (), необходимо сначала точно измерить объем воды, просочившейся при сжатии, а затем измерить уменьшение объема сосуда () при изменении его формы. Если бы это уменьшение было больше объема утекшей воды, то из этого следовало бы, что вода, оставшаяся в шаре, была сжата, несмотря на утечку остальной части. Но это никогда не могло быть выполнено с необходимой для такого эксперимента точностью и аккуратностью; и, следовательно, что касается вопроса о сжимаемости воды, ничего не было доказано. Однако это является очень яркой иллюстрацией пористости такого плотного вещества, как золото, и доказывает, что его поры больше элементарных частиц воды, поскольку последние способны проходить через них.

(36.) С тех пор было доказано, что вода и другие жидкости сжимаемы. В 1761 году Кантон сообщил Королевскому обществу результаты некоторых экспериментов, которые доказали этот факт. Он снабдил стеклянную трубку баллоном, подобным описанному в (28), и наполнил баллон и часть трубки водой, хорошо очищенной от воздуха. Затем он поместил ее в аппарат, называемый конденсатором, с помощью которого он мог подвергнуть поверхность жидкости в трубке очень сильному давлению сконденсированного воздуха. Он обнаружил, что уровень жидкости в трубке заметно понизился при воздействии давления. Тот же эксперимент подтвердил тот факт, что жидкости являются *упругими*, поскольку при снятии давления жидкость поднялась до своего первоначального уровня и, следовательно, восстановила свои прежние размеры.

(37.) Эластичность не всегда сопровождается сжимаемостью. Если подвергнуть свинец или железо ударам молотком, они могут затвердеть и уменьшиться в объеме, но не восстановят свой прежний объем после каждого удара молотком.

(38.) Существуют некоторые тела, которые сохраняют состояние плотности, в котором они обычно находятся, под постоянным воздействием механического давления; такие тела

обладают свойством, в силу которого они могут увеличивать свои размеры без ограничений, если давление, которое их сдерживает, будет снято. Такие тела называются *упругими жидкостями* или *газами* () и всегда существуют в виде обычного воздуха, в механических свойствах которого они участвуют. Поэтому их часто называют *газообразными жидкостями*.

Те, кто имеет воздушный насос, могут легко подтвердить это свойство экспериментально. Возьмите мягкий пузырь, такой как описанный в (27.), и поместите его под стеклянный ресивер воздушного насоса: с помощью этого прибора мы сможем удалить воздух, окружающий пузырь под ресивером, чтобы освободить небольшое количество воздуха, заключенного в пузыре, от давления внешнего воздуха: когда это будет сделано, пузырь начнет раздуваться, как будто его надувают, и будет полностью растянут. Таким образом, воздух, содержащийся в нем, имеет тенденцию к расширению, которое происходит, когда он перестает испытывать сопротивление со стороны давления окружающего воздуха.

(39.) Было сказано, что повышение или понижение температуры сопровождается увеличением или уменьшением объема. В связи с этим существует еще одно явление, слишком заметное, чтобы оставить его без внимания, хотя это не самое подходящее место, чтобы на нем останавливаться: оно является обратным по отношению к предыдущему, а именно: увеличение или уменьшение объема сопровождается понижением или повышением температуры. Поскольку приложение тепла из какого-либо внешнего источника приводит к увеличению размеров, то если размеры увеличиваются по какой-либо другой причине, соответствующая часть тепла, которое имелось в теле до увеличения, будет поглощена в процессе, и температура тем самым снизится. Точно так же, поскольку отвод тепла вызывает уменьшение объема, то если это уменьшение вызвано каким-либо другим способом, тело будет *отдавать* тепло, которое в другом случае было отведено, и его температура будет повышаться.

Многочисленные и хорошо известные факты иллюстрируют эти наблюдения. Кузнец, ударяя молотком по куску прутка и тем самым сжимая его, нагревает его *до красного каления*. Когда воздух сильно сжимается, он нагревается до такой степени, что может воспламенить хлопок и другие вещества. Был сконструирован изобретательный прибор для производства света для бытовых нужд, состоящий из небольшого цилиндра, в котором герметично движется твердый поршень: небольшой трут или сухая губка прикреплены к нижней части поршня, который затем с силой вдавливается в цилиндр: воздух между дном цилиндра и поршнем становится сильно сжатым и выделяет столько тепла, что зажигает трут.

Во всех случаях, когда трение или удар производят тепло или огонь, это происходит потому, что они являются средствами сжатия. Эффекты кремня, трения кусков дерева друг о друга, тепло, производимое трением о плоть, — все это можно отнести к одной и той же причине.

ГЛАВА III.

ИНЕРЦИЯ.

(40.) ТНЕ Качество материи, которое является самым важным из всех других в механических исследованиях, - это то, что было названо *инерцией*.

Материя неспособна к самопроизвольным изменениям. Это один из самых ранних и универсальных результатов человеческих наблюдений: это равносильно утверждению, что простая материя лишена жизни; ибо спонтанное действие - единственный критерий присутствия живого принципа. Если мы видим, что масса материи претерпевает какие-либо изменения, мы никогда не ищем причину этого изменения в самом теле; мы ищем какую-то внешнюю причину, вызывающую это. Эта неспособность к произвольному изменению состояния или качеств является более общим принципом, чем инерция. В любой данный момент времени тело должно находиться в одном из двух состояний - покое или движении. *Инертность*, или *бездействие*, означает полное отсутствие силы изменить это состояние. Тело, наделенное инерцией, не может само по себе и независимо от какого-либо внешнего воздействия начать движение из состояния покоя; оно также не может при движении остановить свое продвижение и стать неподвижным.

(41.) То же самое свойство, благодаря которому тело неспособно какой-либо собственной силой перейти из состояния покоя в состояние движения или *наоборот*, также делает его неспособным увеличивать или уменьшать любое движение, которое оно могло бы получить от внешней причины. Если тело движется в определенном направлении со скоростью десять миль в час, оно не может с помощью какой-либо собственной энергии изменить скорость своего движения до одиннадцати или девяти миль в час. Это прямое следствие того проявления инерции, которое только что было объяснено. Ибо та же сила, которая заставила бы тело, движущееся со скоростью десять миль в час, увеличить свою скорость до одиннадцати миль, также заставила бы то же самое тело в состоянии покоя начать двигаться со скоростью одна миля в час; и та же сила, которая заставила бы тело, движущееся со скоростью десять миль в час, двигаться со скоростью девять миль в час, заставила бы то же самое тело, движущееся со скоростью одна миля в час, остановиться. Следовательно, увеличение или уменьшение движения тела является эффектом того же рода, что и изменение состояния покоя в состояние движения или *наоборот*.

(42.) Эффекты и явления, которые ежечасно попадают под наше наблюдение, представляют собой бесчисленные примеры неспособности безжизненной материи привести себя в движение или усилить любое движение, которое могло быть ей сообщено. Но не бывает так, чтобы у нас были такие же прямые и частые доказательства его неспособности уничтожить или уменьшить любое движение, которое он мог бы получить. И отсюда вытекает, что, хотя никто не будет отрицать в отношении материи первого эффекта инерции, мало кто поначалу признает последнее. Действительно, даже во времена КЕПЛЕРАСАМИ философы придерживались принципа, что "материя более склонна к покою, чем к движению"; поэтому нам не следует удивляться, если в наши дни те, кто не знаком с физической наукой, не

спешат поверить, что тело, однажды приведенное в движение, продолжало бы двигаться с той же скоростью вечно, если бы оно не было остановлено какой-либо внешней причиной.

Разум, подкрепленный наблюдением, однако, вскоре развеет эту иллюзию. Опыт различными способами показывает нам, что те же самые причины, которые уничтожают движение в одном направлении, способны вызвать такое же движение в противоположном направлении. Таким образом, если колесо, вращающееся вокруг своей оси с определенной скоростью, остановить рукой, схватившей одну из спиц, усилие, совершающее это, будет точно таким же, какое, если бы колесо до этого находилось в состоянии покоя, привело бы его в движение в противоположном направлении с той же скоростью. Если карета, запряженная лошадьми, находится в движении, для ее остановки лошадям необходимо такое же усилие, какое потребовалось бы, чтобы *подать* назад, если бы она находилась в состоянии покоя. Теперь, если это принять в качестве общего принципа, то должно быть очевидно, что тело, которое может уничтожить или уменьшить свое собственное движение, должно также быть способно приводить себя в движение из состояния покоя или увеличивать любое движение, которое оно получило. Но это последнее противоречит всякому опыту, и поэтому мы вынуждены признать, что тело не может уменьшить или уничтожить какое-либо движение, которое оно получило.

Давайте зададимся вопросом, почему мы более склонны признать неспособность материи производить, чем уничтожать движение само по себе. Мы видим, что большинство тех движений, которые происходят вокруг нас на поверхности земли, подвержены постепенному затуханию и, если не возобновляются время от времени, в конце концов прекращаются. Камень, катящийся по земле, колесо, вращающееся вокруг своей оси, вздутие морской пучины после шторма и все другие движения, производимые в телах внешними причинами, затухают, когда приостанавливается возбуждающая причина; и если эта причина не возобновляет своего действия, они в конечном счете прекращаются.

Но, с другой стороны, нет ли какой-нибудь возбуждающей причины, которая таким образом постепенно лишает эти тела их движения?— а если бы эту причину устранили или уменьшили ее интенсивность, разве движение не продолжилось бы или замедлилось бы медленнее? Когда камень катят по земле, неровности его формы, а также неровности грунта являются препятствиями, которые замедляют и вскоре разрушают его движение. Сделайте камень круглым, а землю ровной, и движение значительно увеличится. Но все же небольшие неровности останутся на камне и на поверхности, по которой он катится: замените камень шариком из хорошо отполированной стали, движущимся по идеально ровной стальной плоскости, и движение будет продолжаться без заметного уменьшения в течение очень долгого периода; но даже здесь и в каждом случае движений, созданных искусством, на поверхностях, которые соприкасаются друг с другом, должны существовать мелкие неровности, которые должны сопротивляться движению, постепенно уменьшаться и в конечном итоге уничтожить его.

Независимо от препятствий для продолжения движения, возникающих из-за трения, существует еще одно препятствие, которому подвержены все движения на поверхности земли, — сопротивление воздуха. Насколько это может повлиять на продолжение движения, видно по многим знакомым эффектам. В безветренный день носите открытый зонт вогнутой стороной в направлении, в котором вы движетесь, и вашему продвижению будет

противостоять мощное сопротивление, которое будет возрастать с каждым увеличением скорости, с которой вы двигаетесь.

(43.) Однако мы не лишены прямого опыта, чтобы доказать, что движения, которым нет сопротивления, будут продолжаться вечно. На небесах мы находим аппарат, который обеспечивает возвышенную проверку этого принципа. Там, удаленные от всех случайных препятствий и сопротивлений, огромные тела Вселенной катятся по своим назначенным путям с безошибочной регулярностью, сохраняя без уменьшения все то движение, которое они получили при своем сотворении от руки, запустившей их в пространство. Одного этого, не подкрепленного другими причинами, было бы достаточно для установления качества инерции; но, рассматриваемый в связи с другими упомянутыми ранее обстоятельствами, не может оставаться сомнений в том, что это универсальный закон природы.

(44.) Было доказано, что неспособность изменять *количество* движения является следствием *инерции*. Неспособность изменить *направление* движения - еще одно следствие этого качества. Та же самая причина, которая увеличивает или уменьшает движение, также придаст бы движение телу в состоянии покоя; и поэтому мы заключаем, что та же самая неспособность, которая мешает телу двигаться самому, также помешает ему увеличивать или уменьшать любое движение, которое оно получило. Таким же образом мы можем показать, что любая причина, изменяющая направление движения, также придаст движение телу в состоянии покоя; и, следовательно, если тело изменит направление своего собственного движения, то то же самое тело может само перейти из состояния покоя; и, следовательно, способность изменять направление любого движения, которое оно могло получить, несовместима с качеством инерции.

(45.) Если тело, движущееся из точки А, [рис. 3.](#) для В примите в точке В удар в направлении Сb Е, он немедленно изменит свое направление на направление другой линии В D. Причина, вызывающая это изменение направления, привела бы тело в движение в направлении В Е, если бы оно находилось в состоянии покоя в точке В, когда получило удар.

(46.) Опять же, предположим, что Gh - твердая плоская поверхность; и пусть предполагается, что тело совершенно неупругое. Когда он ударится о поверхность в точке В, он начнет двигаться вдоль нее в направлении Vh. Это изменение направления вызвано сопротивлением поверхности. Если бы тело, вместо встречи с поверхностью в направлении Ab, двигалось в направлении Eb, перпендикулярном ей, все движение было бы прекращено, и тело было бы приведено в состояние покоя.

(47.) Из первого примера следует, что отклоняющая причина привела бы неподвижное тело в движение, а из второго - привела бы движущееся тело в состояние покоя. Следовательно, явление изменения направления следует отнести к тому же классу, что и переход от покоя к движению или от движения к покою. Следовательно, качество инерции несовместимо с любым изменением направления движения, которое не вызвано внешней причиной.

(48.) Из всего, что здесь было изложено, мы можем сделать общий вывод, что неодушевленный предмет материи не способен изменять свое состояние покоя или движения; что, в каком бы состоянии он ни находился, в этом состоянии он должен оставаться всегда, если его не потревожит какая-либо внешняя причина; что если он находится в движении, то это движение всегда должно быть *равномерным* или должно происходить с одинаковой скоростью, перемещая равные промежутки за одно и то же

время: любое увеличение его скорости должно указывать на какую-то движущую причину; любое уменьшение должно происходить от препятствующей причины, и ни одна из этих причин не может быть нарушена. существуют в самом теле; что такое движение должно происходить не только постоянно с одной и той же равномерной скоростью, но также всегда в одном и том же направлении, причем любое отклонение от одного равномерного направления обязательно является результатом какого-либо внешнего воздействия.

Язык, который иногда используется для объяснения свойства инерции в популярных произведениях, в высшей степени рассчитан на то, чтобы ввести студента в заблуждение. Термины "сопротивление" и "упрямство" в этом отношении некорректны. Инерция подразумевает абсолютную пассивность, совершенное безразличие к покою или движению. Это подразумевает столь же сильное отсутствие всякого сопротивления восприятию движения, как и отсутствие всякой силы двигаться самой. Термин "*По инерции*" или *сила бездействия*, столь часто используемый даже авторами, претендующими на научную точность, еще более предосудителен. Это противоречие в терминах; термин "*бездействие*" подразумевает отсутствие всякой силы.

(49.) Прежде чем мы завершим эту главу, возможно, будет полезно указать на некоторые практические и знакомые примеры общего закона инерции. Изучающий должен, однако, помнить, что великая цель науки - обобщение, и что его ум должен быть возвышен до созерцания *законов* природы и приобрести привычку, прямо противоположную той, которая располагает нас получать удовольствие от перехода от общего к частному. Примеры, взятые из событий обычной жизни, могут, однако, быть полезны для проверки общего закона и для запечатления его в памяти; и по этой причине мы будем время от времени в настоящем трактате ссылаться на такие примеры; однако всегда сохраняя их в соответствии общими принципами, проявлениями которых они являются и на которых внимание изучающего никогда не должно переставать фиксироваться.

(50.) Если карета, лошадь или лодка, движущиеся со скоростью, внезапно замедляются или останавливаются по какой-либо причине, которая в то же время не влияет на пассажиров, наездников или любые незакрепленные тела, которые перевозятся, они будут ускорены в направлении движения; потому что по причине своей инерции они продолжают движение, которое у них общее с тем, которое их перевозило, и не лишены этого движения по той же причине.

(51.) Если пассажир выпрыгнет из вагона при быстром движении, он упадет в том направлении, в котором движется вагон, в тот момент, когда его ноги коснутся земли; потому что его тело, покидая транспортное средство, сохраняет за счет своей инерции то движение, которое у него было общим с ним. Когда он достигает земли, это движение прекращается из-за сопротивления земли ступням, но сохраняется в верхней и более тяжелой части тела; так что получается тот же эффект, как если бы ступням поставили подножку.

(52.) Когда экипаж однажды приводится в движение с определенной скоростью по ровной дороге, единственная сила, необходимая для поддержания движения, - это сила, достаточная для преодоления трения о дорогу; но при трогании с места требуется большее расходование силы, поскольку необходимо не только преодолеть трение, но и передать ему усилие, с которым транспортное средство предназначено для движения. Следовательно, мы

видим, что лошади прилагают гораздо большее усилие при трогании с места, чем впоследствии, когда экипаж находится в движении; и мы также можем сделать вывод о нецелесообразности попыток трогаться с места на полной скорости, особенно с тяжелыми экипажами.

(53.) *Бег* всем своим интересом обязан инстинктивному осознанию природы инерции, которая, по-видимому, управляет движениями зайца. Борзая - это сравнительно тяжелое тело, движущееся с той же или большей скоростью в погоне. Заяц *двоится*, то есть внезапно меняет направление своего движения и поворачивает обратно под косым углом к направлению, в котором она бежала. Борзую, неспособную сопротивляться стремлению своего тела продолжать быстрое движение, которое она приобрела, подгоняют на много ярдов вперед, прежде чем она оказывается в состоянии сдержать свою скорость и вернуться к преследованию. Тем временем заяц продвигается в другом направлении, так что, когда преследование возобновляется, животные оказываются на очень значительном расстоянии друг от друга. Таким образом, заяц, хотя и гораздо менее проворный, чем борзая, часто ускользнет от нее.

На скачках лошади вылетают далеко за пределы финишной черты, прежде чем их курс удастся остановить.

ГЛАВА IV.

ДЕЙСТВИЕ И РЕАКЦИЯ.

(54.) К эффектам инерции или бездействия, рассмотренным в предыдущей главе, относятся такие, которые могут проявляться отдельным изолированным телом независимо от отношения к какому-либо другому телу. Все они могли бы быть распознаны, если бы во вселенной существовало только одно тело. Однако есть и другие важные результаты этого закона, для разработки которых необходимы по крайней мере два органа.

(55.) Если масса А, [рис. 4.](#), движущаяся в направлении С, столкнется с равной массой, которая находится в состоянии покоя в точке В, то после удара две массы будут двигаться вместе в направлении С. Но будет замечено, что их скорость после удара будет лишь вдвое меньше, чем до него. Таким образом, после удара А теряет половину своей скорости; а В, который до этого находился в состоянии покоя, получает именно такое количество движения. Следовательно, в этом случае оказывается, что В получает ровно столько движения, сколько А теряет: так что реальное количество движения от В к С такое же, как количество движения от А к В.

Теперь предположим, что В состоит из двух масс, каждая из которых равна А, будет обнаружено, что в этом случае скорость тройной массы после удара будет составлять одну треть скорости от А до В. Таким образом, после удара А теряет две трети своей скорости, и, поскольку В состоит из двух масс, каждая из которых равна А, каждая из этих двух получает одну треть движения А; так что все движение, полученное В, составляет две трети движения А до удара. Следовательно, при ударе В получает ровно столько движения, сколько теряет А.

Аналогичный результат будет получен независимо от соотношения масс А и В. Предположим, что В в десять раз больше А; тогда все движение А должно быть распределено после удара между частями объединенных масс А и В: но эти объединенные массы в данном случае в одиннадцать раз больше массы А. Теперь, поскольку все они движутся общим движением, из этого следует, что прежнее движение А должно быть равномерно распределено между ними; так что на каждую часть должна приходиться одиннадцатая ее часть. Следовательно, скорость после удара будет составлять одиннадцатую часть скорости А до удара. Таким образом, А теряет при ударе десять одиннадцатых частей своего движения, которые как раз и получает В.

Опять же, если массы А и В равны 5 и 7, то объединенная масса после удара будет равна 12. Движение А перед ударом будет равномерно распределено между этими двенадцатью частями, так что на каждую часть придется двенадцатая часть массы; но пять из этих частей принадлежат массе А, а семь - массе В. Следовательно, В получит семь двенадцатых, в то время как А сохранит пять двенадцатых.

(56.) Следовательно, в общем случае, когда движущаяся масса А сталкивается с неподвижной массой В, чтобы определить движение объединенной массы после удара, "разделите все движение А на столько равных частей, сколько составляющих масс в А и В

вместе взятых, и тогда В получит при ударе столько частей этого движения, сколько у него равных составляющих масс”.

Это прямое следствие свойства инерции, объясненного в предыдущей главе. Если бы мы предположили, что в результате их взаимного воздействия А должно было придать В либо большее, либо меньшее движение, чем то, которое оно (А) теряет, из этого с необходимостью следовало бы, что либо А, либо В должны обладать способностью производить движение или сопротивляться ему, что было бы несовместимо с уже определенным качеством инерции. Ибо, если А дает В *больше* движения, чем оно теряет, весь избыточный плюс или изливание должно быть возбуждено в В *действием* А; и, следовательно, А не бездействует, но способно возбуждать движение, которым оно не обладает. С другой стороны, В не может получить от А *меньшего* движения, чем теряет А, потому что тогда следует признать, что В обладает способностью своим сопротивлением устранять весь недостаток; способностью по существу активной и несовместимой с качеством инерции.

(57.) Если мы рассмотрим эффекты удара, которые мы сейчас описали, как факты, установленные экспериментально (каковыми они могут быть), мы можем принять их за дальнейшее подтверждение универсальности качества инерции. Но, с другой стороны, мы можем рассматривать их как явления, которые, безусловно, могут быть предсказаны на основе предшествующих знаний об этом качестве; и это один из многих примеров преимущества, которым обладает наука перед знанием *просто* практическим. Получив путем наблюдения или опыта определенное количество простых фактов и, следовательно, выведя общие свойства тел, мы получаем возможность путем демонстративного рассуждения открывать *другие факты*, которые никогда не попадали под наше наблюдение или, если это так, возможно, никогда не привлекали внимания. Таким образом, философы обнаружили определенные небольшие движения и незначительные изменения, происходившие среди небесных тел, и обратили на них внимание астрономических наблюдателей, с величайшей точностью указав им точный момент времени и точку небосвода, на которую они должны направить телескоп, чтобы засвидетельствовать предсказанное событие.

(58.) Поскольку по свойству инерции тело не может ни породить, ни уничтожить движение, из этого следует, что когда два тела каким-либо образом воздействуют друг на друга, общее количество движения в данном направлении после того, как действие имеет место, должно быть таким же, как и до него, ибо в противном случае действием тел было бы произведено некоторое движение, что противоречило бы принципу, согласно которому они инертны. Слово “действие” здесь применено, возможно, неправильно, но в соответствии с употреблением авторов-механиков, для выражения определенного явления или эффекта. Следовательно, его не следует понимать как подразумевающий какое-либо активное начало в телах, которым оно приписывается.

(59.) В случаях столкновения, о которых мы говорили, предполагалось, что одна из масс В находилась в состоянии покоя перед ударом. Теперь мы предположим, что он движется в том же направлении, что и А, то есть к С, но с меньшей скоростью, так что А догонит его и столкнется с ним. После столкновения две массы будут двигаться в направлении С с общей скоростью, величину которой мы сейчас предлагаем определить.

Если массы А и В равны, то их движения или скорости, сложенные вместе, должны быть движением объединенной массы после удара, поскольку это событие не может ни создать, ни уничтожить движение. Но поскольку А и В движутся общим движением, эта сумма должна быть равномерно распределена между ними, и поэтому каждый из них будет двигаться со скоростью, равной половине суммы их скоростей до удара. Таким образом, если А имеет скорость 7, а В - 5, скорость объединенной массы после удара равна 6, что составляет половину от 12, суммы 7 и 5.

Если А и В не равны, предположим, что они разделены на равные составные части, и пусть А состоит из 8, а В из 6 равных масс: пусть скорость А равна 17, так что движение каждой из 8 частей равно 17, движение целого будет равно 136. Точно так же пусть скорость В равна 10, движение каждой части равно 10, общее движение 6 частей будет равно 60. Следовательно, сумма двух движений в направлении С равна 196; и поскольку ничто из этого не может быть потеряно при ударе, равно как и какое-либо добавленное к нему движение, это также должно быть полным движением объединенных масс после удара. Будучи равномерно распределенными между 14 составными частями, из которых состоят эти объединенные массы, каждая часть будет иметь четырнадцатую часть всего движения. Следовательно, разделив 196 на 14, мы получаем частное 14, которое представляет собой скорость, с которой движется целое.

(60.) Следовательно, в общем случае, когда две массы, движущиеся в одном направлении, сталкиваются одна с другой и после столкновения движутся вместе, их общую скорость можно определить по следующему правилу: "Выражайте массы и скорости через числа обычным способом и умножайте числа, выражающие массы, на числа, выражающие скорости; два полученных таким образом произведения складываются вместе, а их сумма делится на сумму чисел, выражающих массы, частное будет числом, выражающим требуемую скорость".

(61.) Из предыдущих подробностей следует, что *движение* неадекватно оценивается по *скорости* или *velocity*. Например, определенная масса А, движущаяся с определенной скоростью, обладает определенной величиной движения. Если к А добавить еще одну равную массу В и придать ей такую же скорость, то, очевидно, возникнет еще большее движение. Другими словами, *две* равные массы А и В, объединенные, имеют в *два* раза больше движения, чем единая масса А при движении в одиночку и с той же скоростью. Те же рассуждения покажут, что *три* равные массы будут с одинаковой скоростью в *три* раза превышать движение любой из них. Следовательно, в общем случае, при одинаковой скорости количество движения всегда будет увеличиваться или уменьшаться в той же пропорции, в какой увеличивается или уменьшается перемещаемая масса.

(62.) С другой стороны, количество движения зависит не *только* от массы, но также и от скорости. Если определенная масса движется с определенной определенной скоростью, то другая равная масса, которая движется с удвоенной скоростью, то есть которая преодолевает вдвое большее пространство за то же время, будет иметь вдвое большее количество движения. Таким образом, при неизменной массе количество движения будет увеличиваться или уменьшаться в той же пропорции, что и скорость.

(63.) Таким образом, истинная оценка количества движения находится путем умножения чисел, выражающих массу и скорость. Таким образом, в последнем приведенном примере столкновения масс величины движения до и после удара выглядят следующим образом:

Перед ударом.		После удара.	
Масса А	8	Масса А	8
Скорость А	17	Общая скорость	14
Количество движения А	$8 \times 17^*$ или 136	Количество движения А	8×14 или 112
Масса В	6	Масса В	6
Скорость В	10	Общая скорость	14
Количество движения В	6×10 или 60	Количество движения В	$6 \times 14 = 84$

* Знак $\times$, помещенный между двумя числами, означал, что они должны быть перемножены вместе.

Из этого расчета следует, что при ударе А потерял количество движения, выраженное 24, и что В получил именно это количество. Следовательно, результатом удара является *перенос* движения из пункта А в пункт В; но в направлении А С не возникает никакого нового движения, которого раньше не существовало. Это, очевидно, согласуется со свойством инерции и действительно является ее неизбежным результатом.

Эти результаты могут быть обобщены и более четко и сжато выражены с помощью арифметических символов.

Пусть a выражает скорость А.

Пусть b выражает скорость В.

Пусть x выражает скорость объединенных масс А и В после удара, причем каждая из этих скоростей выражается в футах в секунду, а массы А и В выражаются весом в фунтах.

Тогда у нас будут импульсы или движущие силы А и В перед ударом, выраженные через $A \times a$ и $B \times b$, а движущая сила объединенной массы после удара будет выражена через $(A + B) \times x$.

Движущая сила А после удара равна $A \times x$, и, следовательно, сила, которую он теряет при столкновении, будет равна $(A \times a - A \times x)$. Сила удара В после удара будет равна $B \times x$, и, следовательно, сила, которую он получит, будет равна $B \times x - B \times b$. Но поскольку сила, теряемая А, должна быть равна силе, приобретаемой В, мы будем иметь

$$A \times a - A \times x = B \times x - B \times b$$

из чего легко сделать вывод

$$(A + B) \times x = A \times a + B \times b$$

и если потребуется выразить скорость объединенных масс после удара, мы имеем

$$x = \frac{A \times a + B \times b}{A + B}$$

Когда говорится, что $A \times a$ and $B \times b$ express the moving forces of A and B, it must be understood that the *unit*, или движущая сила, - сила, с которой масса вещества весом 1 фунт. двигался бы, если бы его скорость составляла 1 фут в секунду, и, соответственно, силы, с которыми A и B движутся перед ударом, во столько раз превышают количество единиц соответственно в числах, обозначаемых общими символами $A \times a$ и $B \times b$.

Аналогичным образом, сила объединенных масс после удара во столько раз превышает силу перемещения 1 фунта через 1 фут в секунду, сколько единиц в числах, выраженных через $(A + B) \times x$.

(64.) Эти явления представляют собой пример закона, выведенного из свойства инерции и обычно выражаемого так— “действие и противодействие равны и имеют противоположные направления”. Однако студент должен быть осторожен, чтобы не получить эти условия в их обычном понимании. После полного объяснения инерции, данного в предыдущей главе, едва ли, пожалуй, необходимо здесь повторять, что в явлениях, проявляющихся в движении двух тел, не может быть ни “действия”, ни “противодействия”, так называемых в собственном смысле. Тела абсолютно неспособны ни к действию, ни к сопротивлению. Смысл, в котором следует понимать эти слова, используемые в законе, является просто выражением *передачи* определенного количества движения от одного тела к другому, что называется *действием* в теле, которое теряет движение, и *реакцией* в теле, которое его получает. Говорят, что *присоединение* движения к последнему происходит от *действия* первого; а *исчезновение* того же движения в первом приписывается *реакции* последнего. Однако вся фразеология в высшей степени неприемлема и нефилософична и рассчитана на создание неверных представлений.

(65.) В последнем случае предполагалось, что падающие тела движутся в одном направлении. Теперь мы рассмотрим случай, когда они движутся в противоположных направлениях.

Сначала предположим, что массы A и B равны и движутся в противоположных направлениях с одинаковой скоростью. Пусть C, [рис. 5.](#), будет точкой, в которой они пересекаются. Равные движения в противоположных направлениях в этом случае уничтожат друг друга, и обе массы будут приведены в состояние покоя. Таким образом, масса A теряет все свое движение в направлении As, которое, как можно предположить, она должна передать B в момент удара. Но B, ранее имевший равное количество движения в направлении Bs, теперь будет иметь два равных движения, воздействующих на него, в направлениях, непосредственно противоположных; и эти движения нейтрализуют друг друга, масса становится неподвижной. Следовательно, в этом случае, как и во всех предыдущих примерах, каждое тело передает другому все движение, которое оно теряет, в соответствии с принципом “действия и противодействия”.

Поскольку массы А и В по-прежнему считаются равными, пусть они движутся к С с разными скоростями. Пусть А движется со скоростью 10, а В - со скоростью 6. Из 10 частей движения, которыми наделен А, 6, передаваемые В, разрушат равную скорость 6, которую В имеет в направлении В С. Затем тела будут двигаться вместе в направлении С_б, при этом четыре оставшиеся части движения А будут равномерно распределены между ними. Следовательно, каждое тело будет иметь две части первоначального движения А, и, следовательно, 2 будет их общей скоростью после удара. В этом случае А теряет 8 из 10 частей своего движения в направлении А С. С другой стороны, В теряет все свои 6 частей движения в направлении В С и получает 2 части в направлении А С. Это эквивалентно получению 8 частей движения А в направлении А С. Таким образом, согласно закону “действия и противодействия”, В получает именно то, что теряет А.

Наконец, предположим, что массы и скорости А и В неодинаковы. Пусть масса А равна 8, а его скорость 9. и пусть масса В равна 6, а его скорость 5. Величина движения А будет равна 72, а В, в противоположном направлении, будет равна 30. Из 72 частей движения, которые А имеет в направлении А С, 30, передаваемые в В, уничтожат все его 30 частей движения в направлении В С, и две массы будут двигаться в направлении С_б, при этом оставшиеся 42 части движения будут равномерно распределены между их 14 составляющими массами. Каждая составная часть, следовательно, получит 3 части движения; и, соответственно, 3 будет общей скоростью объединенной массы после удара.

(66.) Когда две массы, движущиеся в противоположных направлениях, сталкиваются и движутся вместе, их общую скорость после столкновения можно определить по следующему правилу: “Умножьте числа, выражающие массы, на числа, выражающие скорости соответственно, и вычтите меньшее произведение из большего; разделите остаток на сумму чисел, выражающих массы, и частное будет общей скоростью; направление будет таким, какое имеет масса, совершающая большее движение”.

Можно без труда показать, что пример, который мы только что привели, подчиняется закону “действия и противодействия”.

Перед ударом.		После удара.	
Масса А	8	Масса А	8
Скорость А	9	Общая скорость	3
Количество движения в направлении А С	8×9 или 72	Количество движения в направлении А С	8×3 или 24
Масса В	6	Масса В	6
Скорость В	5	Общая скорость	3
Количество движения в направлении В	6×5 или 30	Количество движения в направлении А	$6 \times 3 = 18$

С

С

Следовательно, получается, что количество движения в направлении Ас, которого А был лишен в результате удара, равно 48, то есть разница между 72 и 24. С другой стороны, В теряет в результате удара величину 30 в направлении Вс, что эквивалентно получению 30 в направлении А С. Но он также приобретает количество 18 в направлении А С, которое, добавленное к предыдущим 30, дает в общей сложности 48, полученных В в направлении А С. Таким образом, то же количество движения, которое А теряет в направлении Ас, получает В в том же направлении. Следовательно, выполняется закон “действия и противодействия”.

Этот результат можно аналогичным образом обобщить. При сохранении прежних символов движущие силы А и В до удара будут $A \times a$ и $B \times b$, а их силы после удара будут $A \times x$ и $B \times x$. Следовательно, сила, потерянная А, будет равна $A \times a - A \times x$. Масса В потеряет всю силу $B \times b$, которую она имела в своем прежнем направлении, и получит силу $B \times x$ в противоположном направлении. Следовательно, фактическая сила, приложенная к В при столкновении, будет равна $B \times b + B \times x$. Но поскольку сила, теряемая А, должна быть равна силе, передаваемой В, мы будем иметь

$$A \times a - A \times x = B \times b + B \times x$$

и, следовательно,

$$(A + B) \times x = A \times a - B \times b$$

и если требуется общая скорость после удара, то мы имеем

$$x =$$

$$A \times a - B \times b$$

$$A + B$$

Поэтому, как правило, необходимо найти общую скорость после удара. Умножьте веса на предыдущие скорости и возьмите их сумму, если тела движутся в одном направлении, и их разницу, если они движутся в противоположных направлениях, и разделите то или другое на сумму их весов. Наибольшей будет скорость после удара.

(67.) Примеры равенства действия и противодействия при столкновении тел могут быть экспериментально продемонстрированы с помощью очень простого аппарата. Пусть А, [рис. 6](#) и В будут двумя шариками из мягкой глины или любого другого неэластичного или почти неэластичного вещества, и пусть они будут подвешены к С на равных нитях, так что они могут соприкасаться; и пусть градуированная дуга, центром которой является С, будет расположена так, чтобы шары могли колебаться над ней. Если один из шаров сдвинуть с места покоя по дуге и позволить ему опуститься на другой на определенное количество градусов, он ударится о другой со скоростью, соответствующей этому количеству градусов, и тогда оба шара будут двигаться вместе со скоростью, которая может быть оценена по количеству градусов дуги, по которой они поднимаются.

(68.) Во всех этих случаях, в которых мы объяснили закон “действия и противодействия”, передача движения от одного тела к другому осуществлялась путем удара или соударения.

Явление было выбрано только потому, что это самый обычный способ воздействия тел друг на друга. Однако закон универсален и будет выполняться независимо от того, каким образом тела могут влиять друг на друга. Таким образом, А может быть соединен с В гибкой нитью, которая в начале движения А провисает. До тех пор, пока струна не станет натянутой, то есть до тех пор, пока расстояние А от В не станет равным длине струны, А будет продолжать воспроизводить все движения, которые были вначале нанесены на нее. Но когда струна натягивается, часть этого движения передается В, который затем вытягивается после А; и какое бы движение В таким образом ни получило, А должно проиграть. Все, что было замечено относительно эффекта движения, переданного в результате удара, будет в равной степени применимо и в этом случае.

Опять же, если В, [рис. 4](#), представляет собой магнит, движущийся в направлении В с определенным количеством движений, и пока он движется таким образом, масса железа находится в состоянии покоя в точке А, притяжение магнита притянет железо за собой к С и, таким образом, сообщит железу определенное количество движений в направлении С. Все движение, сообщаемое таким образом железу А, должно быть потеряно магнитом В.

Если бы магнит и утюг были помещены неподвижно в точках В и А, притяжение магнита заставило бы утюг двигаться от А к В; но нельзя буквально сказать, что магнит в этом случае не имеет никакого движения, *передает* железу движение. Однако в тот момент, когда железо начинает двигаться от А к В, будет наблюдаться, что магнит также начинает двигаться от В к А; и если скорости двух тел выразить числами и соответственно умножить на числа, выражающие их массы, то полученные таким образом величины движения окажутся в точности равными. Мы уже объяснили, почему количество движения, полученное в направлении Ва, эквивалентно тому же количеству, потерянное в направлении А В. Следовательно, оказывается, что магнит, получая столько же движения в направлении Ва, сколько он отдает в направлении Ав, испытывает эффект, эквивалентный потере такого же количества движения, направленного в сторону С, сколько он передал железу в том же направлении.

Точно так же, если бы тело В обладало каким-либо свойством, в силу которого оно могло бы *отталкивать* А, оно само отталкивалось бы с такой же скоростью движения. Одним словом, каким бы способом тела ни воздействовали друг на друга, будь то столкновение, сцепление, притяжение или отталкивание, или каким бы другим именем ни обозначалось это явление, все же неизбежным следствием является то, что любое движение в заданном направлении, которое может получить одно из тел, должно сопровождаться потерей движения в том же направлении и в той же степени другим телом или приобретением такого же количества движения в противоположном направлении; или, наконец, потерей в том же направлении и приобретением движения в противоположном направлении, совокупное движение в том же направлении может быть достигнуто. сумма которого равна движению, полученному первым.

(69.) Из принципа, согласно которому сила движущегося тела зависит от массы и скорости, следует, что любое тело, каким бы малым оно ни было, можно заставить двигаться с той же силой, что и любое другое тело, каким бы большим оно ни было, придав меньшему телу скорость, которая относится к скорости большего в той же пропорции, в какой масса большего относится к массе меньшего. Таким образом, перышко, десять тысяч из которых имели бы тот же вес, что и пушечное ядро, двигалось бы с той же силой, если бы его

скорость была в десять тысяч раз больше; и в таком случае эти два тела, сталкиваясь в противоположных направлениях, взаимно уничтожали бы движение друг друга.

(70.) Следствия свойства инерции, которые были объяснены в настоящей и предыдущих главах, были даны Ньютоном в его PRINCIPIA, а после него и в большинстве английских трактатов по механике в форме трех положений, которые называются “законами движения”. Они заключаются в следующем:—

Я.

“Каждое тело должно оставаться в состоянии покоя или равномерного движения по прямой, если только оно не будет вынуждено изменить это состояние под действием действующих на него сил”.

II.

“Каждое изменение движения должно быть пропорционально приложенной силе и должно происходить в направлении той прямой, по которой приложена сила”.

III.

“Действие всегда должно быть равным и противоположным противодействию; или действия двух тел друг на друга должны быть равными и направленными в противоположные стороны”.

Когда определены *инерция* и *сила*, первый закон становится идентичным утверждению. Второй закон не может быть сделан совершенно понятным до тех пор, пока изучающий не прочтет главу о составе и распределении сил, поскольку, по сути, он задуман как выражение всей совокупности результатов, приведенных в этой главе. Третий закон был объяснен в настоящей главе, насколько это возможно сделать понятным на нынешней стадии нашего прогресса.

Мы обратили внимание на эти формулы скорее из уважения к властям, которые их предложили и приняли, чем из-за какой-либо убежденности в их полезности. Их полный смысл не может быть понят до тех пор, пока не будет усвоена почти вся элементарная механика, и тогда все подобные обобщения становятся бесполезными.

(71.) Следствия, выведенные из рассмотрения качества инерции в этой главе, объяснят многие эффекты, которые ежедневно попадают под наше внимание и с которыми мы стали настолько знакомы, что они почти перестали возбуждать любопытство. Один из фактов, наиболее частую практическую иллюстрацию которого мы имеем, состоит в том, что величина движения или *движущая сила*, как это иногда называют, оценивается скоростью движения и весом или массами перемещаемого предмета одновременно.

Если одна и та же сила приводит в движение два шара, один весом в один фунт, а другой - в два фунта, то, поскольку шары не могут ни придавать силу самим себе, ни сопротивляться тому, что на них воздействует, из этого следует, что они будут двигаться с одинаковой силой. Но более легкий шар будет двигаться с удвоенной скоростью, чем более тяжелый. Приложенная сила, которая проявляется в придании скорости удвоенной массе в одном, задействована в придании удвоенной скорости другому.

Если бы пушечное ядро весило в сорок раз больше мушкетной пули, но мушкетная пуля двигалась со скоростью, в сорок раз превышающей скорость пушечного ядра, то оба они ударились бы о любое препятствие с одинаковой силой и преодолели бы одинаковое сопротивление; ибо одно приобрело бы от своей скорости столько же силы, сколько другое извлекает из своего веса.

Очень малая скорость может сопровождаться огромной силой, если масса, перемещаемая с этой скоростью, пропорционально велика. Большое судно, плывущее рядом с причальной стенкой, может приближаться к ней с такой малой скоростью, что ее будет едва заметно, и все же сила будет настолько велика, что раздавит маленькую лодку.

Дробинка, выпущенная из руки и попавшая в человека, не причинит боли и даже почти не будет ощущаться, в то время как каменная глыба, имеющая ту же скорость, приведет к смерти.

Если движущееся тело ударяется о неподвижное тело, то ударяющееся тело должно выдержать такой же сильный удар от столкновения, как если бы оно находилось в состоянии покоя и было поражено другим телом с такой же силой. Ибо потеря силы, которую он поддерживает в одном направлении, является эффектом того же рода, как если бы, находясь в состоянии покоя, он получил столько же силы в противоположном направлении. Если человек, быстро идущий или бегущий, сталкивается с другим человеком, стоящим неподвижно, он страдает от столкновения так же сильно, как и человек, на которого он наезжает.

Если выпустить свинцовую пулю в доску из твердого дерева, то обнаружится, что круглая форма пули разрушена и что она сама испытала силу удара, эквивалентную тому эффекту, который она производит на доску.

Когда встречаются два тела, движущиеся в противоположных направлениях, каждое тело испытывает такой сильный удар, как если бы, находясь в состоянии покоя, оно было поражено другим телом объединенными силами обоих. Таким образом, если два равных шара, движущихся со скоростью десять футов в секунду, встретятся, то каждый будет поражен с такой же силой, как если бы другой, находясь в состоянии покоя, двигался против него со скоростью двадцать футов в секунду. В этом случае одна часть полученного удара возникает из-за потери силы в одном направлении, а другая - из-за получения силы в противоположном направлении.

По этой причине два человека, идущие в противоположных направлениях, получают от столкновения более сильный шок, чем можно было бы ожидать. Если они имеют почти одинаковый вес и один идет со скоростью три, а другой - четыре мили в час, каждый испытывает такой же шок, как если бы он находился в состоянии покоя и был поражен другим, бегущим со скоростью семь миль в час.

Этот принцип объясняет разрушительные последствия столкновения судов друг с другом в море. Если два судна грузоподъемностью 500 тонн сталкиваются друг с другом, двигаясь со скоростью десять узлов в час, каждое из них испытывает удар, который в состоянии покоя оно получило бы от судна грузоподъемностью 1000 тонн, движущегося со скоростью десять узлов в час.

Ошибочно полагать, что при столкновении большого и малого тел маленькое тело испытывает больший шок, чем большое. Удар, который они выдерживают, должен быть одинаковым, но крупное тело, возможно, лучше переносит его.

Когда кулак боксера ударяет по телу своего противника, он выдерживает настолько сильный шок, насколько это возможно; но поскольку кулак более приспособлен для того, чтобы выдержать удар, травма и боль наносятся его противнику. Однако это не тот случай, когда кулак встречается с кулаком. Тогда части тела при столкновении одинаково чувствительны и уязвимы, и эффект усугубляется тем, что оба соприкасаются друг с другом с большой силой. Эффект удара такой же, как если бы один кулак, удерживаемый в состоянии покоя, был нанесен другим с объединенной силой обоих.

ГЛАВА V.

СОСТАВ И РАЗРЕШЕНИЕ ВООРУЖЕННЫХ СИЛ.

(72.) Движение и давление - термины слишком знакомые, чтобы нуждаться в объяснении. В целом можно заметить, что определения, содержащиеся в первых зачатках науки, редко, если вообще когда-либо, постигаются. Сила слов познается при их применении; и только после того, как определение становится бесполезным, нас учат значению терминов, в которых оно выражено. Более того, мы, возможно, вправе сказать, что в математических науках фундаментальные понятия носят настолько несложный характер, что определения, будучи развитыми и расширенными, часто втягивают нас в метафизические тонкости и различия, которые, каковы бы ни были их достоинства или важность, были бы здесь совершенно неуместны. Следовательно, мы сразу примем как должное, что слова *движение* и *давление* выражают явления или эффекты, которые являются объектами постоянного опыта и ежечасного наблюдения; и если научное употребление этих слов будет более точным, чем их общее и популярное применение, то эта точность вскоре будет подтверждена их частым использованием в настоящем трактате.

(73.) Сила - это название, данное в механике всему, что производит движение или давление. Это слово также часто используется для выражения самого движения или давления; и когда причина движения или давления неизвестна, это единственно правильное употребление этого слова. Таким образом, когда кусок железа движется к магниту, обычно говорят, что причиной движения является "притяжение магнита;" но фактически мы невежественны *причиной* этого явления; и имя *притяжения* будет лучше случае действие которых у нас есть опыт. Подобным образом *притяжение* и *отталкивание* наэлектризованных тел следует понимать не как названия неизвестных причин, а как слова, выражающие наблюдаемые явления или эффекты.

Однако, когда определенный фразеологизм вошел во всеобщее употребление, заменить его нелегко и не удобно. Следовательно, говоря о движении и давлении, мы будем вынуждены использовать язык причинности; но должны сообщить изучающему, что будут выражаться следствия, а не причины.

(74.) Если две силы действуют на одну и ту же точку тела в разных направлениях, может быть назначена единая сила, которая, действуя на эту точку, приведет к тому же результату, что и совместное действие двух других.

Пусть P , [рис. 7.](#) будет точкой, на которую действуют две силы, и пусть их направлениями будут Pa и PB . От точки P по прямой Pa возьмем длину Pa , состоящую из стольких дюймов, сколько унций в силе Pa ; и, аналогичным образом, возьмем Pb , в направлении Pb , состоящую из стольких дюймов, сколько унций в силе PB . Через a проведите линию, параллельную Pb , а через b проведите линию, параллельную Pa , и предположим, что эти линии пересекаются в точке c . Затем нарисуйте PC . Единственная сила, действующая в направлении PC и состоящая из стольких унций, сколько линия PC состоит из дюймов, произведет на точку P тот же эффект, что и две силы Pa и Pb , действующие вместе.

(75.) Фигура $P a c b$ называется в ГЕОМЕТРИИ *параллелограммом*; линии $P a$, $P b$ называются ее *сторонами*, а линия $P c$ называется ее *диагональю*. Таким образом, метод нахождения эквивалента для двух сил, который мы только что объяснили, обычно называется “параллелограмм сил” и обычно выражается так: “Если две силы представлены по количеству и направлению сторонами параллелограмма, эквивалентная сила будет представлена по количеству и направлению его диагональю”.

(76.) Одна сила, которая, таким образом, механически эквивалентна двум или более другим силам, называется их *равнодействующей*, а относительно нее они называются ее *составляющими*. В любом механическом исследовании, когда результирующая используется для получения компонентов, которыми она всегда может быть, этот процесс называется “составлением силы”. Однако часто бывает целесообразно заменить одну силу двумя или более силами, которым она механически эквивалентна или равнодействующей которых она является. Этот процесс называется “силовым решением”.

(77.) Экспериментально проверить теорему о параллелограмме сил нетрудно. Пусть два маленьких колеса размером Mn , [рис. 8](#), с канавками по краям для продевания резьбы, будут прикреплены к вертикальной доске или к стене. Пропустите через них нить с грузиками A и B , закрепленными за петли на ее концах. К любой части P нити между колесами подвешивают груз C : он потянет нить вниз так, чтобы образовать угол $M P N$, и устройство остановится в некотором определенном положении. В этом состоянии очевидно, что, поскольку груз C , действующий в направлении Pc , уравнивает грузы A и B , действующие в направлениях Pm и Pn , эти две силы должны быть механически эквивалентны силе, равной весу C , и действующей непосредственно вверх от P . Следовательно, вес C является величиной равнодействующей сил Pm и Pn ; а направление равнодействующей соответствует направлению линии, проведенной прямо вверх от P .

Чтобы убедиться, насколько это согласуется с теоремой о “параллелограмме сил”, проведем линию Po на вертикальной доске, к которой прикреплены колеса, от точки P вверх, в направлении нити $C P$. Кроме того, пусть линии будут проведены на доске непосредственно под нитями Pm и $P N$. От точки P на линии Po отберите столько дюймов, сколько унций в весе C . Пусть измеренная таким образом часть Po будет $P c$, и от c проведите ca параллельно Pn , а cb параллельно $P M$. Если измерить стороны $P a$ и $P b$ образованного таким образом параллелограмма, то окажется, что $P a$ будет состоять из столько дюймов, сколько унций содержится в гирьке A , а $P b$ - из столько дюймов, сколько унций содержится в гирьке B .

На этом рисунке в качестве единиц измерения *веса* и *длины* были использованы *унции* и *дюймы*. Вряд ли есть необходимость утверждать, что любые другие измерения этих величин также послужили бы, заметив лишь, что одни и те же наименования должны быть сохранены во всех частях одного и того же исследования.

(78.) Среди философского аппарата Лондонского университета есть очень простой и удобный инструмент, который я сконструировал для экспериментальной иллюстрации этой важной теоремы. Колеса $M N$ крепятся к верхушкам двух высоких стоек, высоту которых можно изменять по своему усмотрению с помощью регулировочного винта. Формируется сочлененный параллелограмм, $A B C D$, [рис. 9](#), стороны которого разделены на дюймы, а стыки в точках A и B подвижны, так что можно изменять длину сторон по своему усмотрению. Шарнир C закреплен на конце линейки, также разделенной на дюймы, в то время как противоположный шарнир A прикреплен к латунной петле, которая свободно

окружает диагональную линейку, чтобы свободно скользить по ней. В этой петле предусмотрен регулировочный винт, позволяющий закрепить ее в любом требуемом положении.

При проведении эксперимента стороны AB и AD , CB и CD регулируются шарнирами B и A на то же количество дюймов соответственно, что и унции в грузиках A и B , [рис. 8](#). Затем диагональ AC регулируется петлей и винтом в точке A на столько дюймов, сколько унций в весе C . После этого точка A помещается позади P , [рис. 8](#) и параллелограмм удерживается вертикально, так что диагональ AC должна находиться в направлении вертикальной резьбы PC . Затем будет обнаружено, что стороны AB и AD принимают направление нитей PM и PN . Изменяя вес и длину диагонали и сторон параллелограмма, эксперимент можно легко разнообразить по своему усмотрению.

(79.) В примерах сочетания сил, которые мы здесь привели, действием сил является создание давлений, или, говоря более корректно, теорема, которую мы проиллюстрировали, - это "сочетание давлений". Предполагается, что точка P находится в состоянии покоя и должна быть нарисована или нажата в направлениях PM и PN . В определении, которое было дано слову "сила", заявлено, что оно включает в себя движения, а также давления. Фактически, если движению оказывать сопротивление, эффект преобразуется в давление. Одна и та же причина, действующая на тело, вызовет либо движение, либо давление, в зависимости от того, свободно тело или ограничено. Если тело свободно, возникает движение; если ограничено, давление или оба этих эффекта вместе. Следовательно, по аналогии можно ожидать, что те же самые теоремы, которые регулируют давления, будут применимы и к движениям; и, соответственно, мы находим наиболее точное соответствие.

(80.) Если тело движется в направлении Ab , а в точке P оно получает другое движение, такое, которое унесло бы его в направлении Pc , [рис. 10](#), если бы оно предварительно находилось в состоянии покоя при P , требуется определить направление, которое примет тело, и скорость, с которой оно будет двигаться при этих обстоятельствах.

Пусть скорость, с которой тело перемещается из пункта A в пункт B , такова, что оно перемещалось бы через определенное пространство, предположим, Pn , за одну секунду времени, и пусть скорость движения, воздействующего на него в точке P , такова, что, если бы у него не было предыдущего движения, оно переместилось бы из пункта P в пункт M за одну секунду. Из точки M проведите линию, параллельную Pb , а из N - линию, параллельную Pc , и предположим, что эти линии пересекаются в некоторой точке, как O . Затем проведите линию PO . Вследствие двух движений, которые одновременно воздействуют на тело в точке P , оно будет двигаться по прямой от точки P к O .

Таким образом, два движения, которые выражаются в количестве и направлении сторонами параллелограмма, будучи заданы одному и тому же телу, произведут единое движение, выраженное в количестве и направлении его диагональю; теорема, которая относится к движениям точно так же, как первая относилась к давлениям.

Существуют различные методы экспериментальной иллюстрации состава движения. Шар из слоновой кости, помещенный на идеально ровный квадратный стол в одном из углов и получающий два равных импульса в направлениях сторон стола, будет двигаться по диагонали. Аппараты для этого эксперимента отличаются друг от друга только способом передачи импульсов на шар.

(81.) Поскольку два движения, одновременно сообщаемые телу, эквивалентны одному движению в промежуточном направлении, точно так же одно движение может быть механически заменено двумя движениями в направлениях, выраженных сторонами любого параллелограмма, диагональ которого представляет одно движение. Этот процесс является “разрешением движения” и придает значительную ясность и легкость многим механическим исследованиям.

(82.) Часто бывает необходимо выразить долю данной силы, которая действует в некотором заданном направлении, отличном от непосредственного направления самой силы. Таким образом, если сила действует со стороны А, [рис. 11.](#) в направлении А С нам может потребоваться оценить, какая часть этой силы действует в направлении А В. Если сила представляет собой давление, отнимите столько дюймов Ар от А на линии Ас, сколько унций в силе, и от Р проведите Рм перпендикулярно Аb; тогда часть силы, действующая вдоль Аb, составит столько унций, сколько дюймов в А М. Сила Аb механически эквивалентна двум силам, выраженным сторонами Ам и Ап параллелограмма; но Ап, будучи перпендикулярным Аb, не может оказывать никакого воздействия на тело в точке А в направлении Аb, и поэтому эффективная часть силы Ар в направлении Аb выражается через А М.

(83.) Любое количество сил, действующих на одну и ту же точку тела, может быть заменено одной силой, которая механически эквивалентна им и которая, следовательно, является их равнодействующей. Эта композиция может быть осуществлена путем последовательного приложения параллелограммных сил. Пусть эти несколько сил называются А, В, С, D, Е и с. Нарисуйте параллелограмм, стороны которого выражают силы А и В, и пусть его диагональ равна А'. Сила, выраженная через А', будет эквивалентна А и В. Затем нарисуйте параллелограмм, стороны которого выражают силы А' и С, и пусть его диагональ равна В'. Эта диагональ будет выражать силу, механически эквивалентную А' и С. Но А' механически эквивалентно А и В, и, следовательно, В' механически эквивалентно А, В и С. Затем постройте параллелограмм, стороны которого выражают силы В' и D, и пусть его диагональ равна С'. Сила, выраженная через С', будет механически эквивалентна силам В' и D; но сила В' эквивалентна А, В, С, и, следовательно, С' эквивалентно А, В, С и D. Продолжая этот процесс, становится очевидным, что может быть найдена единственная сила, которая будет эквивалентна любому количеству сил, действующих в одной и той же точке, и всегда может быть заменена ими.

Если силы, действующие на точку, нейтрализуют друг друга, так что движение не может возникнуть, говорят, что они находятся в равновесии.

(84.) Примеры сочетания движения и давления постоянно представляются. Они встречаются почти в каждом случае движения или силы, который попадает в поле нашего наблюдения. Трудность состоит в том, чтобы найти пример, который, строго говоря, представляет собой простое движение.

Когда лодку переплывают через реку, в которой есть течение, она не будет двигаться в том направлении, в котором ее толкают весла. Он также не примет направление потока, но будет двигаться точно в том промежуточном направлении, которое определяется составом силы.

Пусть А, [рис. 12](#), укажите место, где находилась лодка при старте; и предположим, что весла работают так, чтобы толкать лодку к пункту В с силой, которая отнесла бы ее к пункту В за один час, если бы в реке не было течения. Но, с другой стороны, предположим, что скорость течения такова, что без каких-либо усилий гребцов лодка поплыла бы вниз по течению за один час до С. От С проведите С D параллельно А В и проведите прямую линию А D по диагонали. Совместное действие весел и течения приведет к тому, что лодку понесет вдоль линии D, и через час она прибудет к противоположному берегу, в точку D.

Следовательно, если цель состоит в том, чтобы достичь точки В, начиная с точки А, гребцы должны рассчитать, насколько это возможно, скорость течения. Они должны представить себе определенную точку Е на таком расстоянии над В, чтобы лодка проплыла по течению от Е до В за время, затраченное на пересечение реки в направлении А Е, если бы течения не было. Если они поплывут к точке Е, лодка прибудет в точку В, двигаясь по линии А В.

В этом случае лодка приводится в движение двумя силами: силой весел в направлении А Е и силой течения в направлении А С. Результатом будет, в соответствии с параллелограммом сил, движение по диагонали А В.

Ветер и прилив, действующие на судно, являются примером аналогичного рода. Предположим, что ветер направлен на то, чтобы толкать судно в направлении киля, в то время как прилив может действовать в любом направлении, наклонном к килю. Курс судна определяется точно таким же образом, как и курс лодки в последнем примере.

Действие самих весел при приведении лодки в движение является примером соотношения сил. Пусть А, [рис. 13](#), будь носом, а В - кормой лодки. Лодочник поворачивается лицом к В и кладет весла так, чтобы их лопасти касались воды в направлениях С Е, D F. Сопротивление воды создает силы на борту лодки в направлениях G I и H I, которые по составу сил эквивалентны диагональной силе K I в направлении киля.

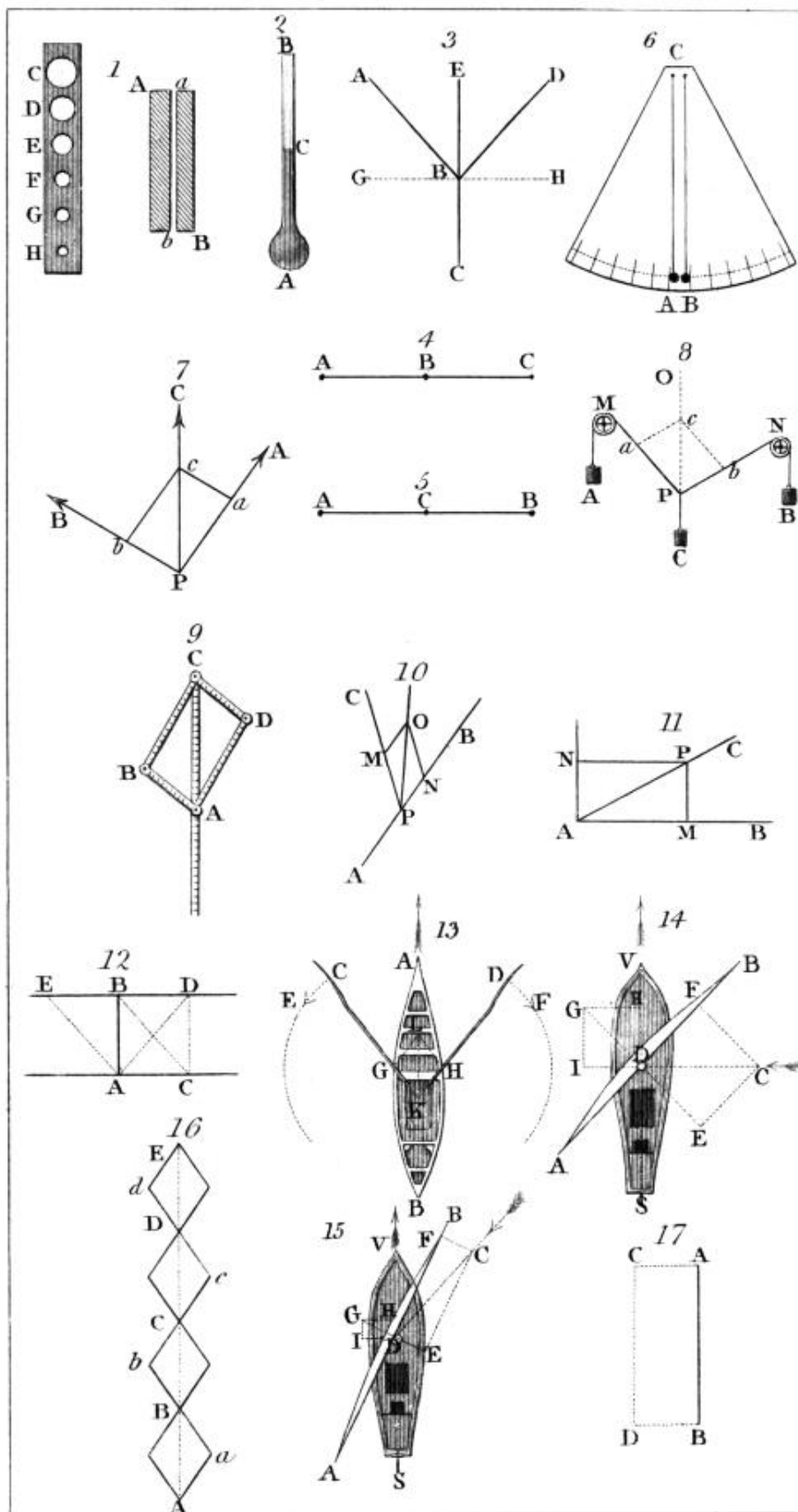
Аналогичные наблюдения применимы почти к любому телу, приводимому в движение инструментами, выступающими с его боков и действующими против жидкости. Движения рыб, акт плавания, полет птиц - все это примеры одного и того же рода.

(85.) Действие ветра на паруса судна и сила, передаваемая таким образом на киль, изменяемая рулем направления, - это проблема, которая решается с помощью принципов состава и распределения силы; но она слишком сложна по своей природе, чтобы быть представленной здесь со всеми ее необходимыми условиями и ограничениями. Вопрос, однако, может быть упрощен, если мы предположим, что полотно парусов натянуто настолько, что образует плоскую поверхность. Пусть А В, [рис. 14](#), определите положение паруса и позвольте ветру дуть в направлении С D. Если взять прямую С D для выражения силы ветра, то пусть D Е F - параллелограмм, диагональю которого он является. Сила Сd эквивалентна двум силам, одна из которых направлена в направлении Fd плоскости полотна, а другая Ed перпендикулярна парусу. Следовательно, эффект такой же, как если бы было *два ветра*, один из которых дул в направлении F D или В А, то есть против края паруса, а другой, Е D, дул прямо в лицо. Очевидно, что первое не окажет никакого воздействия на парус, а второе будет подталкивать судно в направлении D G.

Теперь рассмотрим эту силу D_g как действующую по диагонали параллелограмма $D_h G I$. Это будет эквивалентно двум силам, D_h и D_i , действующим вдоль сторон. Одна из этих сил, D_h , направлена в направлении киля, а другая, D_i , расположена под прямым углом к длине судна, так что *толкает его в сторону*. Форма сосуда, очевидно, такова, что оказывает большое сопротивление последней силе и очень слабое - первой. Следовательно, он движется со значительной скоростью в направлении D_h своего киля и очень медленно продвигается в боковом направлении D_i . Последний эффект называется *подветренностью*.

Из этого объяснения будет легко понять, каким образом ветер, почти противоположный курсу судна, может, тем не менее, быть приведен в движение действием парусов. Угол $B D_v$, образованный парусом и направлением киля, может быть очень наклонным, как и угол $C D_b$, образованный направлением ветра и направлением паруса. Следовательно, угол $C D V$, состоящий из этих двух величин и образованный направлением ветра и направлением киля, может быть очень наклонным. На [рис. 15](#), ветер почти противоположен направлению киля, и все же существует движущая сила, выраженная линией D_h , линия Cd , как и раньше, выражает всю силу ветра.

В этом примере есть два последовательных разложения силы. Сначала первоначальная сила ветра Cd разлагается на две, Ed и Fd ; а затем элемент Ed , или равный ему D_g , разлагается на D_i и D_h ; так что первоначальная сила разлагается на три, а именно. $F D$, $D I$, $D H$, которые, взятые вместе, механически эквивалентны ему. Часть $F D$ совершенно неэффективна; она скользит по поверхности холста, не оказывая никакого воздействия на сосуд. Часть $D I$ производит *движение с подветренной стороны*, а часть $D H$ побуждает.



Х. Адлард, Шотландия

Лондон, издательство Longman & Co.

(86.) Однако, если ветер прямо противоположен курсу, который требуется от судна, то парусам нельзя придать такое положение, которое привело бы судно в движение. В этом случае сам требуемый курс делится на два, по которым судно плывет попеременно, - процесс, который называется *лавированием*. Таким образом, предположим, что судну требуется перейти из пункта А в пункт Е, [рис. 16](#). установка ветра из пункта Е в пункт А. Движение Аb разделяется на два, если принять его за диагональ параллелограмма, стороны А а, а В параллелограмма последовательно пересекаются, и таким образом судно достигает точки В, вместо того чтобы двигаться по диагонали А В. Таким же образом она движется вдоль В b, b С, С с, с D, D d, d, и достигает Е. Таким образом, судно постоянно плывет под достаточным углом к ветру, чтобы получить движущую силу, но при этом под достаточно малым углом, чтобы проложить предполагаемый курс.

Рассмотрение действия руля направления, которое мы опустили на предыдущем рисунке, дает еще один пример распределения силы. Однако мы не будем дальше рассматривать этот пример.

(87.) Тело, падающее с вершины мачты, когда судно идет под всеми парусами, является примером композиции движения. Можно было бы ожидать, что во время спуска тела судно, проплывшее вперед, оставит его позади, и что, следовательно, оно упадет в воду за кормой или, по крайней мере, на палубу, значительно позади мачты. С другой стороны, обнаруживается, что он падает к подножию мачты точно так же, как это было бы, если бы судно не находилось в движении. Чтобы учесть это, пусть А В, [рис. 17](#), будет положением мачты, когда корпус наверху отсоединен. Мачта движется вперед вместе с судном в направлении Ас, так что за то время, которое потребуется корпусу, чтобы упасть на палубу, верхушка мачты переместится из положения А в положение С. Но тело, находящееся на мачте в момент ее отсоединения, имеет это движение, общее с мачтой; и поэтому при его опускании на него воздействуют два движения, а именно. движение судна выражается буквой С, а его нисходящее движение выражается буквой В. Следовательно, по общеположению движения оно будет найдено под противоположным углом D параллелограмма, в конце падения. Однако во время падения мачта сдвинулась вместе с судном и продвинулась вперед до С D, так что тело упало у подножия мачты.

(88.) Пример состава движения, заслуживающий некоторого внимания, поскольку он дает доказательство суточного движения земли, получен из наблюдения падения тела с очень высокой башни. Чтобы упростить объяснение этого, предположим, что башня находится на экваторе земли. Пусть Е Р Q, [рис. 18](#), будет сечением земли через экватор, и пусть Рt будет башней. Предположим, что земля движется вокруг своей оси в направлении Ер Q. Следовательно, основание Р башни за один день переместится по окружности Ер Q, в то время как вершина Т переместится по большей окружности Т Т' R. Отсюда очевидно, что вершина башни перемещается с большей скоростью, чем основание, и, следовательно, за то же время перемещается через большее пространство. Теперь предположим, что тело помещено на вершину; оно участвует в движении, которое вершина башни имеет общего с землей. Если он отключен, он также получает нисходящее движение Т Р. Предположим, что телу потребовалось бы пять секунд, чтобы упасть с Т на Р, и что в то же время вершина Т перемещается вращением земли с Т на Т', а нога перемещается с Р на Р'. Следовательно, падающее тело совершает два движения, одно из которых выражается через Т Т', а другое - через Т Р. Совокупный эффект этих движений будет найден обычным способом с помощью

параллелограмма. Примем T_p равным $T_{T'}$; тело переместится из T в p во время падения и коснется земли в точке p . Но поскольку $T_{T'}$ больше, чем $P_{P'}$, отсюда следует, что точка p должна находиться на расстоянии от P' , равном превышению $T_{T'}$ над $P_{P'}$. Следовательно, тело упадет не точно у подножия башни, а на определенном расстоянии от нее, в направлении движения земли, то есть на восток. Экспериментально установлено, что это действительно так; и расстояние от подножия башни, на которое наблюдается падение тела, согласуется с расстоянием, вычисленным по движению земли, с такой высокой степенью точности, какой можно было ожидать исходя из характера эксперимента.

(89.) Свойства сложных движений приводят к тому, что некоторые из конных трюков, демонстрируемых на публичных зрелищах, выполняются с усилием, сильно отличающимся от того, которое зрители обычно приписывают исполнителю. Например, всадник, стоящий в седле, перепрыгивает через подвязку, натянутую на лошадь под прямым углом к его движению; когда лошадь проходит под подвязкой, всадник садится в седло с противоположной стороны. Усилие исполнителя в данном случае не такое, какое он использовал бы, если бы ему пришлось перепрыгивать с земли через подвязку на той же высоте. В последнем случае он делал усилие, чтобы подняться, и в то же время подавал свое тело вперед. Однако в случае всадника он просто делает то усилие, которое необходимо для того, чтобы подняться прямо вверх на достаточную высоту, чтобы освободиться от подвязки. Движение, которое у него общее с лошадью, в сочетании с высотой, достигаемой его мускульной силой, завершает прыжок.

Чтобы объяснить это более полно, пусть $A B C$, [рис. 19](#),- направление, в котором движется лошадь, A - точка, в которой всадник покидает седло, а C - точка, в которой он возвращается в него. Пусть D - высшая точка, которая должна быть пройдена в прыжке. В точке A всадник совершает прыжок в сторону точки E , и это должно быть сделано на таком расстоянии от B , чтобы он поднялся из B в E за то время, за которое лошадь перемещается из A в B . Таким образом, при выезде из точки A у гонщика есть два движения, представленные линиями Ae и Ab , по которым он будет перемещаться из точки A в противоположный угол D параллелограмма. В точке D усилие при прыжке преодолевается весом его тела, он начинает возвращаться вниз и упадет из точки D в точку B за то время, пока лошадь перемещается из точки B в точку C . Но в точке D он все еще сохраняет движение, которое у него было общим с лошадью; и поэтому, покидая точку D , он имеет два движения, выраженных линиями Df и Db . Совокупные эффекты этих движений переносят его из пункта D в пункт C . Строго говоря, его движение из пункта A в пункт D и из пункта D в пункт C происходит не по прямым линиям, а по кривой. Однако здесь нет необходимости обращать внимание на это обстоятельство.

(90.) Если бильярдный шар ударится о подушку стола наискось, он отразится от нее в определенном направлении, образуя угол с направлением, в котором он ударился. Это дает пример разрешения и композиции движения. Сначала мы рассмотрим эффект, который возник бы, если бы мяч ударился о подушку перпендикулярно.

Пусть $A B$, [рис. 20](#),- подушка, а $C D$ - направление, в котором мяч движется к ней. Если бы мяч и подушка были совершенно неэластичными, сопротивление подушки нарушило бы движение мяча, и он был бы приведен в состояние покоя в точке D . Если бы, с другой стороны, мяч был идеально эластичным, он отразился бы от подушки и получил бы такое же движение от D к C после удара, какое он имел от C к D до этого. Однако совершенная

эластичность - это качество, которое никогда не встречается в этих телах. Они всегда эластичны, но не идеально. Следовательно, мяч после удара будет отражен от D в сторону C, но с меньшим движением, чем то, с которым он приближался от C к D.

Теперь предположим, что мяч, вместо того чтобы двигаться от C к D, движется от E к D. Сила, с которой он ударяет по D, выражается через DE' , равную Ed , и может быть разделена на два, Df и Dc' . Сопротивление подушки разрушает Dc' , а эластичность создает противоположную силу в направлении Dc , но меньшую, чем Dc или Dc' , поскольку эта эластичность несовершенна. Линия Dc , выражающая силу в направлении C D, пусть Dg (меньше Dc) выражает отражающую силу в направлении D C. Другой элемент Df , в который сила De' преобразуется в результате удара, не разрушается и не изменяется подушкой, и поэтому, покидая подушку в точке D, на мяч воздействуют две силы: Df (которая равна Ce) и Dg . Следовательно, он будет двигаться по диагонали Dh .

(91.) Угол EdC в этом случае называется “углом падения”, а CdH называется “углом отражения”. Из того, что только что было выведено, очевидно, что шар, будучи несовершенным упругим, угол падения всегда должен быть меньше угла отражения, и при том же наклоне падения, чем более несовершенной будет упругость, тем меньше будет угол отражения.

При ударе идеально упругого тела угол отражения был бы равен углу падения. Ибо тогда линия Dg , выражающая отражающую силу, была бы принята равной Cd , а угол CdH был бы равен CdE . Экспериментально установлено, что это имеет место, когда свет отражается от полированной поверхности стекла или металла.

Движение иногда различают на *абсолютное* и *относительное*. Что означает “относительное движение”, легко объяснить. Если человек проходит по палубе корабля от носа до кормы, он совершает относительное движение, которое измеряется пространством на палубе, по которому он проходит за данный момент времени. Но пока он таким образом идет от носа к корме, корабль и его содержимое, включая его самого, движутся по пучине в противоположном направлении. Если случится так, что движение человека от носа к корме будет в точности равно движению корабля в обратном направлении, то человек будет находиться относительно поверхности моря и земли в состоянии покоя. Таким образом, относительно корабля он находится в движении, в то время как относительно поверхности земли он находится в покое. Но все же это не абсолютный покой. Сама поверхность движется за счет суточного вращения Земли вокруг своей оси, а также за счет годового движения по своей орбите вокруг Солнца. Все эти и другие движения, которым подвержена земля, должны быть сведены к теореме о параллелограмме сил, прежде чем мы сможем получить *абсолютное состояние* тела относительно движения или покоя.

ГЛАВА VI.

ПРИТЯЖЕНИЕ.

(92.) Все, что производит или стремится произвести изменение состояния частицы или массы вещества относительно движения или покоя, является силой. Следовательно, покой, или равномерное прямолинейное движение, являются единственными состояниями, в которых может существовать любое тело, не подверженное текущему действию какой-либо силы. Однако мы не вправе делать вывод, что, поскольку тело наблюдается в том или ином из этих состояний, на него, следовательно, не оказывают влияния какие-либо силы. Она может находиться под непосредственным действием сил, которые нейтрализуют друг друга: таким образом, на нее могут действовать две равные силы в противоположных направлениях. В таком случае его состояние покоя или равномерного прямолинейного движения не будет нарушено. Состояние равномерного прямолинейного движения говорит о теле больше, чем состояние покоя; ибо первое выдает действие силы на тело в некоторый предшествующий период; это действие было приостановлено, в то время как его эффект продолжает наблюдаться в движении, которое оно произвело.

(93.) Когда состояние тела меняется с покоя на равномерное прямолинейное движение, действие силы является лишь кратковременным, и в этом случае оно называется *импульсом*. Если тело, находящееся в равномерном прямолинейном движении, получит импульс в направлении, в котором оно движется, результатом будет то, что оно продолжит равномерно двигаться в том же направлении, но его скорость будет увеличена на величину скорости, которую придал бы ему импульс, если бы оно ранее находилось в состоянии покоя. Таким образом, если предыдущее движение совершалось со скоростью десять футов в секунду, а импульс был таким, что выводил его из состояния покоя со скоростью пять футов в секунду, скорость после импульса составит пятнадцать футов в секунду.

Но если импульс будет получен в направлении, непосредственно противоположном предыдущему движению, то он уменьшит скорость на ту величину скорости, которую он придал бы телу, если бы оно ранее находилось в состоянии покоя. В уже приведенном примере, если бы импульс был противоположен предыдущему движению, скорость тела после импульса составила бы пять футов в секунду. Если импульс, полученный в направлении, противоположном движению, будет таким, что придаст покоящемуся телу скорость, равную той, с которой оно движется, то результатом будет то, что после импульса движения не будет; и если импульс придаст ему еще большую скорость, тело будет двигаться в противоположном направлении с равномерной скоростью, равной превышению скорости, вызванной импульсом, над той, которую тело имело ранее.

Когда тело, находящееся в состоянии равномерного движения, получает импульс в направлении, не совпадающем с направлением его движения, оно будет равномерно двигаться после импульса в промежуточном направлении, которое может быть определено принципами, установленными для построения движения в предыдущей главе.

Таким образом, оказывается, что всякий раз, когда состояние тела изменяется либо от состояния покоя к равномерному прямолинейному движению, либо *наоборот*, либо от одного состояния равномерного прямолинейного движения к другому, отличающемуся от него либо скоростью, либо направлением, либо и тем и другим, явление вызывается той особой модификацией силы, действие которой продолжается лишь одно мгновение и которая была названа *импульсом*.

(94.) Однако в большинстве случаев наблюдается, что механическое состояние тела подвержено постоянному изменению или тенденции к изменению. Мы окружены бесчисленными примерами этого. Тело кладут на стол. На поверхность стола создается постоянное давление. Это давление является лишь следствием постоянной тенденции тела двигаться вниз. Если бы тело было возбуждено силой, подобной импульсу, воздействие на стол было бы мгновенным и немедленно прекратилось бы. На самом деле это было бы *ударом*. Но продолжение давления доказывает продолжение действия силы.

Если стол убрать из-под тела, то сила, которая его возбуждает, поскольку ей больше не сопротивляются, вызовет движение; это проявляется не как раньше в тенденции вызывать движение, а в фактическом проявлении этого явления. Теперь, если бы возбуждающая сила была импульсом, тело опускалось бы на землю с одинаковой скоростью. С другой стороны, как будет показано ниже, каждый момент его падения увеличивает его скорость, и эта скорость наибольшая в тот момент, когда он соприкасается с землей.

Кусок железа, помещенный на некотором расстоянии от магнита, приближается к нему, но не с одинаковой скоростью. Сила магнита продолжает действовать во время приближения железа, и с каждым мгновением оно движется все сильнее.

(95) Силы, которые, таким образом, находятся в постоянном действии, исходят от тайных агентов, которые человеческий разум никогда не был в состоянии обнаружить. Все аналогии с природой доказывают, что они не являются непосредственными результатами божественной воли, а являются вторичными причинами, то есть следствиями некоторых более отдаленных принципов. Подняться к этим вторичным причинам и, таким образом, как бы приблизиться на один шаг к Творцу - великая задача философии; и наиболее верным средством для достижения этого является усердное наблюдение, сравнение и классификация явлений и избегание предположения о существовании чего-либо, что либо не было непосредственно замечено, либо что не может быть выведено наглядно из природных явлений. Философия должна следовать за природой, а не руководить ею.

В то время как закон инерции, установленный наблюдением и разумом, заявляет о неспособности материи, исходя из любого присутствующего в ней принципа, изменять свое состояние, все явления Вселенной доказывают, что это состояние находится в постоянном, но регулярном колебании. В настоящее время не существует ни единого случая явления абсолютного покоя или движения, которое было бы абсолютно равномерным и прямолинейным. В телах или частях тел нет ни одного известного примера простого пассивного сопоставления, не сопровождающегося давлением или натяжением, или какой-либо другой "тенденцией к движению". Бесчисленные тайные силы постоянно действуют, как бы компенсируя инертность и обеспечивая материальный мир заменой принципам действия и воли, которые придают такое неизмеримое превосходство характеру жизни.

(96.) Силы, которые, таким образом, находятся в постоянном действии, существование которых подтверждается их наблюдаемыми эффектами, но природа, местонахождение и способ действия которых нам неизвестны, называются общим названием *притяжения*. Эти силы классифицируются в соответствии с аналогиями, преобладающими среди их воздействий, таким же образом и согласно тем же принципам, как группируются организованные существа в естественной истории. В этом отделе естествознания, когда индивиды распределяются по классам, целью является просто обобщение и тем самым содействие расширению знаний; но таким образом ничего не предполагается и не должно предполагаться относительно сущности или реального внутреннего строения индивидов. Согласно их внешним и наблюдаемым признакам и качествам, они классифицируются; и эта классификация никогда не должна приводиться как свидетельство чего-либо, кроме того сходства качеств, которому она обязана своим происхождением.

Явления для натурфилософа - то же, что организованные существа для натуралиста. Он группирует и классифицирует их по тем же принципам и с аналогичной целью. И как натуралист дает каждому виду название, применимое к индивидуальным существам, проявляющим соответствующие качества, так и философ дает каждой силе или влечению название, соответствующее явлениям, причиной которых она является. Натуралист не осведомлен о реальной сущности или внутреннем строении предмета, который он называет, и о том, каким образом он приобретает или проявляет те качества, которые составляют основу его классификации; и натурфилософ в равной степени не осведомлен о природе, местонахождении и способе действия силы, которую он определяет как причину наблюдаемого класса эффектов.

Эти наблюдения относительно истинного значения термина “притяжение” кажутся тем более необходимыми, что общая фразеология физической науки, принятая в качестве общепринятого языка, по-видимому, передает нечто большее. Названия нескольких аттракционов, на которые нам придется обратить внимание, часто относят местонахождение причины к конкретным объектам и, по-видимому, подразумевают что-то, относящееся к способу их действия. Таким образом, когда мы говорим “магнит притягивает кусок железа”, истинный философский смысл этих слов заключается в том, что “кусок железа, помещенный поблизости от магнита, будет двигаться к нему или соприкасаться с ним, будет прилипать к нему, так что необходима некоторая сила, чтобы разделить их”. Однако в обычном смысле подразумевается нечто большее, чем этот простой факт. Подразумевается, что магнит является средоточием силы, которая приводит в движение железо; что в возникновении явления магнит является *агентом* оказывающим определенное влияние, *субъектом* является железо. Однако всему этому нет доказательств; напротив, поскольку магнит должен двигаться к железу с такой же силой, с какой железо движется к магниту, есть столько же причин поместить источник силы в железо и рассматривать его как агент, воздействующий на магнит. Но на самом деле влияние, вызывающее это явление, может не проявляться ни в одном теле, ни в другом. Можно представить, что это свойство среды, в которой помещены оба, или что оно возникает из какого-то третьего тела, присутствие которого не наблюдается непосредственно. Какими бы привлекательными ни были эти и подобные им спекуляции, им не должно быть места в физических исследованиях, и нельзя допускать, чтобы следствия, вытекающие из таких гипотез, омрачали наши выводы их неопределенностью.

Поэтому изучающий должен осознавать, что, что бы ни подразумевалось языком, используемым в этой науке по отношению к влечениям, ничто не может служить основой рассуждений о них, кроме *их эффектов*; и каким бы ни было общее значение используемых терминов, именно к этим эффектам, и только к ним, их следует относить.

(97.) Притяжения могут быть в первую очередь разделены на два класса; один состоит из притяжений, существующих между молекулами или составными частями тел, а другой - между самими телами. Первые иногда для различения называют *молекулярными* или *атомными* притяжениями.

Без участия молекулярных сил весь лик природы был бы лишен разнообразия и красоты; вселенная представляла бы собой беспорядочную кучу материальных атомов, рассеянных в пространстве, без формы, связности или движения. Тела не имели бы форм твердого тела, жидкости или воздуха; тепло и свет больше не производили бы своих обычных эффектов; организованные существа не могли бы существовать; сама жизнь, связанная с телом, исчезла бы. Атомы материи, как удаленные, так и находящиеся рядом, не имели бы тенденции менять свои места, и все было бы в вечной тишине и покое. Итак, если нас попросят доказать существование молекулярных сил, мы можем указать на землю и на небеса; мы можем назвать каждый объект, который можно увидеть или пощупать. Весь материальный мир - это один великий результат влияния этих могущественных агентов.

(98.) Это было доказано ([11](#) и далее.), что составляющие тела частицы непостижимо малы и что они не находятся в непосредственном контакте ([23](#)), а отделены друг от друга промежуточными пространствами, которые, как и сами атомы, хотя и слишком малы, чтобы их можно было наблюдать непосредственно, все же неоспоримо доказаны наблюдаемыми явлениями, из которых демонстративно следует их существование. Соппротивление, которое каждое тело оказывает сжатию, доказывает, что между частицами преобладает отталкивающее воздействие и что это отталкивание является причиной, которая удерживает атомы разделенными и поддерживает только что упомянутые промежуточные пространства. Хотя обнаружено, что это отталкивание существует между молекулами любых веществ, какими бы они ни были, все же оно имеет разную степень энергии в разных телах. Это подтверждается тем фактом, что некоторые вещества легко поддаются сжатию, в то время как для других веществ необходимо приложить значительное усилие, чтобы произвести наименьшее уменьшение объема.

Пространство вокруг каждого атома тела, через которое распространяется это отталкивающее воздействие, обычно ограничено, и непосредственно за его пределами проявляется сила противоположного рода, а именно. притяжение. Таким образом, в твердых телах частицы сопротивляются разделению так же, как и сжатию, и приложение силы необходимо как для разрушения тела или разделения его на отдельные части, так и для более тесного объединения его частиц. Именно благодаря этому притяжению твердые тела сохраняют свою форму и что их части не разделяются и не рассеиваются, как у жидкостей, просто под действием их собственного веса. Эта сила называется *притяжением сплоченности*.

Сила сцепления действует в разных веществах с разной степенью энергии: в некоторых ее интенсивность очень велика; но сфера ее влияния, по-видимому, очень ограничена. Так

обстоит дело со всеми твердыми, прочными и хрупкими телами, которые никакая сила не может растянуть в сколько-нибудь заметной степени и которым требуется большое усилие, чтобы разорвать их на части. Таковы, например, чугун, некоторые камни и различные другие вещества. В некоторых телах сила сцепления слаба, но сфера ее действия значительна. Тела, которые легко растягиваются, не будучи сломанными или разорванными на части, служат примерами этого. К таковым относятся индийский каучук, или каучукопродукт, некоторые продукты животного и растительного происхождения и, в общем, все твердые вещества мягкого и вязкого вида.

Между этими крайними значениями сила сцепления может наблюдаться в различной степени. В свинце и других мягких металлах его сфера действия больше, а энергия меньше, чем в первых примерах; но его сфера меньше, а энергия больше, чем в последних. Именно под влиянием этой силы и силы отталкивания, сфера действия которой еще ближе к составляющим атомам, возникают все разновидности текстуры, которые мы называем твердыми, мягкими, огрубевшими, хрупкими, пластичными, податливыми и т. Д.

После разрушения или иного разделения части твердого тела могут быть снова соединены посредством их сцепления при условии, что любое значительное количество точек будет приведено в достаточно плотный контакт. Однако, когда это делается моимимеханическими средствами, сцепление становится не таким сильным, как до их разделения, и сравнительно небольшой силы снова будет достаточно, чтобы разъединить их. Два свежесрезанных куска свинца с гладкими поверхностями будут прилипать при нажатии друг к другу, и потребуются значительное усилие, чтобы их разъединить. Точно так же, если порвать кусок индийской резины, разделенные части снова соединятся, если их свести вместе с небольшим нажимом. Соединение частей в таких случаях легко, потому что сфера, через которую распространяется влияние сцепления, значительна; но даже в телах, в которых это влияние распространяется через более ограниченное пространство, сцепление отдельных частей будет проявляться при условии, что их поверхности хорошо отполированы, чтобы обеспечить близкое сближение большого количества их частиц. Таким образом, две полированные поверхности из стекла, металла или камня будут склеиваться при соприкосновении.

Во всех этих случаях, если тела разъединить механической силой, они разделятся точно на те части, которыми они были соединены, так что после их разделения ни одна часть одного не прилипнет к другой; это доказывает, что сила сцепления соприкасающихся поверхностей меньше той, которая естественным образом удерживала частицы каждого из них вместе.

(99.) Когда тело находится в жидкой форме, вес его частиц значительно преобладает над их взаимным сцеплением, и, следовательно, если такое тело не ограничено, оно будет рассеяно под действием собственного веса; если его поместить в какой-либо сосуд, оно под действием своего веса осядет в самых нижних частях, так что в сосуде под верхней поверхностью жидкости не останется свободного места. Частицы твердого тела, помещенные в сосуд, имеют точно такую же тенденцию из-за своего веса; но этой тенденции противостоит их сильное сцепление и она не дает им проявиться.

Хотя это сцепление в твердых телах намного больше, чем в жидкостях, и приводит к более очевидным эффектам, все же этот принцип не остается совсем незамеченным в жидкостях. Вода, превращенная в пар под действием тепла, разделяется на невероятно мелкие частицы, которые поднимаются в атмосферу. Когда он там лишается части того тепла, которое

придало ему парообразную форму, частицы в силу своей силы сцепления собираются в круглые капли, в виде которых они опускаются на землю.

Точно так же, если позволить жидкости постепенно стекать с горловины сосуда, она не будет выделяться бесконечно малыми частицами, как если бы ее масса была некогерентной, подобно песку или порошку, но будет падать каплями значительной величины. Чем больше сила сцепления, тем больше размер этих капель. Таким образом, масло и вязкие жидкости падают крупными каплями, эфир, спирт и другие - мелкими.

Две капли дождя, стекающие по оконному стеклу, сливаются, когда они приближаются друг к другу; и то же явление становится еще более замечательным, если несколько капель ртути разбросать по горизонтальной пластине стекла.

Именно принцип сцепления придает крупинкам дробы округлость: жидкому металлу позволено падать дождем с большой высоты. При падении капли становятся по-настоящему шаровидными, и прежде чем они достигнут конца своего падения, они затвердевают при охлаждении, так что сохраняют свою форму.

Также, вероятно, связывающему притяжению следует приписать шаровидные формы всех великих тел Вселенной; солнца, планет, спутников и т. Д., Которые первоначально могли находиться в жидком состоянии.

(100.) Молекулярное притяжение также проявляется между частицами жидкостей и твердых тел. Капля воды не будет свободно опускаться, когда она соприкасается с перпендикулярной плоскостью стекла: она прилипнет к стеклу; ее опускание замедлится; и если ее веса будет недостаточно, чтобы преодолеть силу сцепления, она останется подвешенной.

Если стеклянную пластину поместить на поверхность воды, не давая ей утонуть, потребуется большее усилие, чтобы поднять ее из воды, чем достаточно просто для уравнивания веса стекла. Это показывает адгезию воды и стекла, а также силу сцепления, с которой частицы воды сопротивляются разделению.

Если иглу окунуть в определенные жидкости, капля останется взвешенной на ее кончике, когда ее извлекут из них: и, как правило, когда твердое тело погружено в жидкость и извлечено, оно *влажное*; то есть часть жидкости прилипла к его поверхности. Если бы между твердым телом и жидкостью не существовало притяжения, твердое вещество после погружения находилось бы в том же состоянии, что и раньше. Это подтверждается жидкостями и твердыми телами, между которыми не существует притяжения. Если кусок стекла погрузить в ртуть, то при извлечении он будет в том же состоянии, что и до погружения. К нему не прилипнет ртуть; он не будет *влажным*.

Когда идет дождь, человек и одежда страдают только потому, что между ними и водой существует притяжение. Если бы пошел дождь из ртути, ни одна из них не прилипла бы к ним.

(101.) Когда жидкости, проникающие в промежутки между пористыми телами, поднимающиеся по щелям или отверстиям небольших трубок, проявляют молекулярное притяжение, это называется *капиллярным притяжением*. Примеров этому бесчисленное множество. Таким образом, жидкости втягиваются в поры бисквита, сахара, фитиля лампы и

т. Д. Животный и растительный мир предоставляет многочисленные примеры этого класса эффектов.

Груз, подвешенный на сухой веревке, будет подниматься вверх на значительную высоту, если веревку смочить влажной губкой. Притяжение частиц, составляющих веревку, к воде в этом случае настолько велико, что натяжение, создаваемое несколькими сотнями килограммов веса, не может вытеснить их.

Стеклянная трубка с небольшим отверстием, опущенная в воду, окрашенную смесью с небольшим количеством чернил, сохранит некоторое количество жидкости во взвешенном состоянии при извлечении. Высоту жидкости в трубке можно увидеть, посмотрев через нее. Обнаружено, что чем меньше диаметр трубки, тем больше будет поддерживаться высота колонны. При погружении в жидкость ряда таких трубок, закрепленных в одной раме, с их нижними отверстиями на одном уровне и с постепенно уменьшающимися отверстиями, будут наблюдаться колонны, постепенно увеличивающиеся.

А *капиллярный сифон* состоит из мотка хлопчатобумажных ниток, один конец которых погружают в сосуд с жидкостью, а другой вводят в сосуд, в который должна переливаться жидкость. Таким образом, жидкость может переливаться из одного сосуда в другой. Тот же эффект может быть достигнут с помощью стеклянного сифона с небольшим отверстием.

(102.) Часто случается, что между твердым телом и жидкостью возникает *молекулярное отталкивание*. Если кусок дерева погрузить в ртуть, жидкость будет вдавливаясь в ту часть поверхности, которая находится рядом с деревом; и точно так же, если она содержится в стеклянном сосуде, она будет вдавливаясь по краям. В трубке барометра поверхность ртути выпуклая, отчасти из-за отталкивания стекла от ртути.

Однако не все твердые вещества отталкивают ртуть. Если окунуть в эту жидкость какую-либо золотую безделушку или хотя бы на мгновение соприкоснуться с ней, золото мгновенно смешается с частицами ртути, металл изменит свой цвет и станет белым, как серебро, а ртуть можно извлечь только с помощью сложного процесса. Цепи, уплотнения, кольца и т.д. Всегда должны быть отложены в сторону теми, кто участвует в экспериментах или других процессах, в которых используется ртуть.

(103.) Из всех форм, в которых проявляется молекулярная сила, та, в которой она носит название *сродства*, сопровождается наиболее заметными эффектами. Сродство в химии является тем же, чем инерция в механике, основой науки. Настоящий трактат не является подходящим местом для какого-либо подробного описания этого важного класса природных явлений. Тех, кто ищет такие знания, отсылаем к нашему трактату по химии. Поскольку, однако, сродство иногда влияет на механическое состояние тел и влияет на их механические свойства, здесь необходимо будет изложить о нем столько, чтобы сделать понятными те ссылки, которые нам может представиться случай сделать на такие эффекты.

Когда частицы различных тел приводятся в тесный контакт, и особенно когда, находясь в текучем состоянии, они смешиваются вместе, часто наблюдается, что при их соединении образуется составное тело, отличающееся по своим качествам от любого из составляющих тел. Таким образом, объем соединения часто больше или меньше общего объема составляющих его тел. Составляющие тела могут иметь обычную температуру атмосферы, и все же соединение может иметь гораздо более высокую или более низкую температуру. Компоненты могут быть жидкими, а соединение твердым. Цвет соединения может не иметь

никакого сходства с цветом компонентов. Вид молекулярного взаимодействия между компонентами, которое вызывает эти и подобные эффекты, называется *сродством*.

(104.) Мы ограничимся здесь изложением нескольких примеров этих явлений.

Если смешать пинту воды и пинту серной кислоты, то получится значительно меньше литра. Таким образом, плотность смеси больше, чем та, которая могла бы возникнуть в результате простой диффузии частиц одной жидкости через частицы другой. Частицы оказались ближе друг к другу и, следовательно, проявляют взаимное притяжение.

В этом эксперименте, хотя температура жидкостей перед смешиванием равна температуре окружающего воздуха, смесь будет настолько сильно нагрета, что к сосуду, в котором она находится, невозможно прикоснуться без боли.

Если две воздухообразные жидкости, называемые кислородом и водородом, смешать вместе в определенной пропорции, то получится вода. В данном случае компоненты отличаются от состава не только тем, что один из них является *воздухом*, а другой *жидкостью*, но и в других отношениях, не менее поразительных. Составная вода тушит огонь, и все же из входящих в нее компонентов водород является одним из наиболее легковоспламеняющихся веществ в природе, а присутствие кислорода совершенно необходимо для поддержания явления горения.

Газообразный кислород, соединяясь со ртутью, образует соединение черного цвета, при этом ртуть белая, а газ бесцветный. Когда эти вещества соединяются в другой пропорции, они дают красную смесь.

(105.) Рассмотрев основные молекулярные силы, мы перейдем теперь к рассмотрению тех притяжений, которые проявляются между телами, существующими в массах. Влияние молекулярного притяжения ограничено незначительными расстояниями. Напротив, силы, которые сейчас следует отметить, действуют на значительных расстояниях, и влиянию некоторых из них нет предела, однако эффект уменьшается с увеличением расстояния.

Воздействие магнита на железо хорошо известно и относится к этому классу сил. Для подробного описания этой силы и различных явлений, причиной которых она является, читателя отсылают к нашему трактату о МАГНЕТИЗМЕ.

Когда стекло, воск, янтарь и другие вещества подвергаются трению шелковой или шерстяной тканью, наблюдается, что они притягивают перья и другие легкие объекты, расположенные рядом с ними. Подобный эффект достигается несколькими другими способами и сопровождается другими явлениями, обсуждение которых составляет основную часть физической науки. Проявляемая таким образом сила называется электричеством. За подробностями о нем и о его связи с магнетизмом читатель может обратиться к нашим трактатам по ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ и ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМУ.

(106.) Эти притяжения существуют либо между телами определенного вида, либо развиваются путем приведения тел, которые их проявляют, к определенному состоянию трением или каким-либо другим способом. Существует, однако, притяжение, которое проявляется между телами всех видов и при любых обстоятельствах; притяжение, интенсивность которого совершенно не зависит от природы тел и зависит только от их масс и взаимных расстояний. Таким образом, если массу металла и массу глины поместить в

обширную бездну пространства на расстоянии мили друг от друга, они мгновенно начнут приближаться друг к другу с определенными скоростями. Опять же, если массу камня и дерева, соответственно равную первой, поместить на одинаковом расстоянии, они также начнут сближаться друг с другом с теми же скоростями, что и первая. Это всеобщее притяжение, которое только зависит от количества масс и их взаимного расстояния, называется “притяжением тяготения”. Сначала мы объясним “закон” этого притяжения, а затем укажем на некоторые из основных явлений, благодаря которым известно о его существовании и его законах.

(107.) “Закон всемирного тяготения”, иногда из-за его универсальности называемый “законом природы”, может быть объяснен следующим образом:

Предположим, что две массы, А и В, находятся вне влияния или притяжения любых других тел, в состоянии покоя и на любом предполагаемом расстоянии друг от друга. Из-за взаимного притяжения они будут приближаться друг к другу, но не с одинаковой скоростью. Скорость А будет больше, чем у В, в той же пропорции, в какой его масса меньше, чем у В. Таким образом, если масса В вдвое больше массы А, в то время как А приближается к В на расстояние в два фута, В приблизится к А на расстояние в один фут. Отсюда следует, что сила, с которой А движется к В, равна силе, с которой В движется к А (68). Это всего лишь следствие свойства инерции и является примером равенства действия и противодействия, как объясняется в главе IV. Скорость, с которой А и В приближаются друг к другу, оценивается по уменьшению их расстояния, Ab , при их взаимном сближении за данный момент времени. Таким образом, если за одну секунду А переместится к В на расстояние в два фута, и в то же время В переместится к А на расстояние в один фут, они приблизятся друг к другу на расстояние в три фута за секунду, что и будет их относительной скоростью (91).

Если массу В удвоить, она будет притягивать А с удвоенной прежней силой или, что то же самое, заставит А приближаться к В с удвоенной прежней скоростью. Если массу В утроить, она будет притягивать А с утроенной первой силой, и, в общем, пока расстояние между А и В остается неизменным, сила притяжения В к А будет увеличиваться или уменьшаться точно в той же пропорции, в какой увеличивается или уменьшается масса В.

Таким же образом, если массу А удвоить, она будет притягиваться В с удвоенной силой, потому что В оказывает одинаковую степень притяжения на каждую часть массы А, и любое добавление, которое он может получить, не уменьшит или иным образом не повлияет на влияние В на его прежнюю массу.

Чтобы выразить это в общих арифметических символах, пусть a и b выражают пространство, через которое А и В соответственно перемещались бы навстречу друг другу под действием их взаимного притяжения. Тогда у нас был бы

$$A \times a = B \times b.$$

Таким образом, общий закон всемирного тяготения гласит, что до тех пор, пока расстояние между двумя телами остается неизменным, каждое из них будет притягиваться другим пропорционально своей массе; и любое увеличение или уменьшение массы вызовет соответствующее увеличение или уменьшение силы притяжения.

(108.) Теперь мы объясним закон, согласно которому притяжение изменяется путем изменения расстояния между телами. На расстоянии одной мили тело В притягивает А с определенной силой. На расстоянии двух миль, при неизменных массах, притяжение В к А составит одну четвертую от его величины на расстоянии одной мили. На расстоянии трех миль он составит одну девятую от своего первоначального количества; на расстоянии четырех миль он уменьшается до шестнадцатой, и так далее. В следующей таблице показано уменьшение притяжения, соответствующее последовательному увеличению расстояния:

Расстояние	1	2	3	4	5	6	7	8	ит.д.
Притяжение	1	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{36}$	$\frac{1}{49}$	$\frac{1}{64}$	идр.

В АРИФМЕТИКЕ то число, которое получается путем умножения любого предложенного числа на само себя, называется его *квадратом*. Таким образом, 4, то есть 2, умноженное на 2, равно квадрату 2; 9, то есть 3, умноженное на 3, равно квадрату 3, и так далее. Таким образом, при рассмотрении приведенной выше таблицы будет очевидно, что сила притяжения уменьшается в той же пропорции, в какой увеличивается квадрат расстояния от притягивающего тела, при этом предполагается, что масса обоих тел в этом случае остается одинаковой; но если масса любого из них будет увеличена или уменьшена, притяжение будет увеличено или уменьшено в той же пропорции.

(109.) Следовательно, закон всемирного тяготения можно выразить так: “Взаимное притяжение двух тел возрастает в той же пропорции, в какой увеличиваются их массы и уменьшается квадрат их расстояния; и оно уменьшается пропорционально, в какой уменьшаются их массы и в какой увеличивается квадрат их расстояния”.

Этот закон может быть более четко выражен с помощью общих символов. Пусть f выражает силу, с которой масса весом 1 фунт будет притягивать другую массу весом 1 фунт на расстоянии 1 фута. Сила, с которой они будут взаимно притягиваться при удалении на расстояние, выраженное в футах через D , будет равна

$$\frac{f}{D^2}$$

то есть сила f , деленная на квадрат числа D .

Если одно из тел весит не 1 фунт, а количество фунтов, выраженное через A , то их взаимное притяжение увеличится в A раз и, следовательно, будет выражено через

$$\frac{A \times f}{D^2}$$

В общем, если другое значение также равно количеству фунтов, выраженному через В, их взаимное притяжение будет

$$A \times B \times f$$

$$D^2$$

(110.) Объяснив закон всемирного тяготения, мы теперь перейдем к тому, чтобы показать, как доказывается существование этой силы и открывается ее закон.

Известно, что земля представляет собой шаровидную массу вещества, несравненно большую, чем любое из отдельных тел, которые находятся на ее поверхности. Если одно из этих тел, подвешенных на любой предполагаемой высоте над поверхностью земли, отсоединить, будет наблюдаться, что оно опускается перпендикулярно земле, то есть в направлении центра земли. Сила, с которой оно опускается, также окажется пропорциональной массе, без какого-либо учета вида тела. Эти обстоятельства согласуются с описанием гравитации, которое мы дали. Но исходя из этого, мы должны ожидать, что поскольку падающее тело притягивается к земле с определенной силой, сама земля должна притягиваться к нему с той же силой; и вместо того, чтобы падающее тело двигалось к земле, что и является наблюдаемым явлением, земля и оно должны двигаться навстречу друг другу и встретиться в некоторой промежуточной точке. Это, на самом деле, так, хотя сделать движение земли наблюдаемым невозможно по причинам, которые легко понять.

Поскольку все тела вокруг нас участвуют в этом движении, оно не было бы непосредственно наблюдаемым, даже если бы его количество было достаточно велико, чтобы быть замеченным при других обстоятельствах. Но если оставить в стороне это соображение, то пространство, через которое движется земля, в таком случае слишком мало, чтобы быть предметом разумного наблюдения. Было заявлено (107), что когда два тела притягиваются друг к другу, пространство, через которое большее приближается к меньшему, относится к тому, через которое меньшее приближается к большему, в той же пропорции, в какой масса меньшего относится к массе большего. Итак, масса земли более чем в 1000 000 000 000 000 000 раз превышает массу любого тела, которое, по наблюдениям, падает на ее поверхность; и поэтому, если бы даже самое большое тело, которое может попасть под наблюдение, упало с высоты 500 футов, соответствующее движение земли происходило бы на пространстве, меньшем, чем 1000 000 000 000 000 000-я часть 500 футов, что меньше, чем 100 000 000 000 000-я часть дюйма.

Притяжение между землей и оторванными телами на ее поверхности проявляется не только в падении этих тел без поддержки, но и в их давлении при поддержке. Это давление называется *весом*. Явления веса и падения тяжелых тел будут полностью исследованы в следующей главе.

(111.) Земное притяжение проявляется не только в прямом падении тел. Криволинейное движение тел, проецируемых в направлениях, отличных от перпендикулярных, представляет собой комбинацию эффектов равномерной скорости, которая была придана снаряду импульсом, который он получил, и ускоренной скорости, которую он получает от притяжения земли. Предположим, что тело помещено в любую точку Р, [рис. 21.](#) над

поверхностью земли, и пусть P_c будет направлением центра земли. Если бы телу было позволено двигаться, не получая никакого импульса, оно бы опускалось на землю в направлении P_a с ускоренным движением. Но предположим, что в момент своего вылета из P оно получает импульс в направлении P_b , который доставил бы его в B за то время, пока тело будет падать из P в A , тогда, по составу движения, тело должно в конце этого времени находиться на линии Bd , параллельной $P A$. Если бы движение в направлении P_a было равномерным, тело P в этом случае двигалось бы по прямой от P к D . Но это не так. Скорость тела в направлении P_a вначале настолько мала, что приводит к очень незначительному отклонению его движения от линии P_b . Однако с увеличением скорости это отклонение увеличивается, так что оно перемещается от P к D по выпуклой кривой в направлении $P B$.

Чем больше скорость снаряда в направлении P_a , тем больший размах примет кривая. Таким образом, он будет последовательно принимать формы P_d , P_e , P_f и с., и можно вычислить ту скорость, которая (без учета сопротивления воздуха) заставила бы снаряд полностью обогнуть землю и вернуться в точку P , из которой он вылетел. В этом случае тело P продолжало бы вращаться вокруг земли подобно Луне. Следовательно, очевидно, что феномен обращения Луны вокруг земли есть не что иное, как совокупный эффект притяжения земли и импульса, который она получила, когда была запущена в космос рукой своего Создателя.

(112.) Это большой шаг в анализе явления тяготения. Таким образом, мы свели к одному классу два эффекта, по-видимому, очень несходных, прямолинейное падение тяжелого тела и почти круговое обращение Луны вокруг земли. Следовательно, мы приходим к еще более обширному обобщению.

Поскольку обращение луны вокруг Земли по орбите, близкой к круговой, вызвано сочетанием притяжения земли и первоначального импульса снаряда, то и необычные явления обращения планет вокруг Солнца по орбитам, близким к круговым, следует рассматривать как эффект того же класса, что и вращение спутников тех планет, которые сопровождаются такими телами. Хотя орбиты, по которым движутся кометы, сильно отклоняются от окружностей, все же это не мешает применять к ним тот же принцип, их отклонение от окружностей зависит не от притяжения Солнца, а только от направления и силы первоначального импульса, который привел их в движение.

(113.) Следовательно, мы приходим к выводу, что гравитация - это принцип, который, так сказать, оживляет вселенную. Все великие изменения и перевороты тел, составляющих нашу систему, могут быть прослежены до этого принципа или выведены из него. Остается показать, как можно проверить и установить тот замечательный закон, по которому эта сила увеличивается или убывает в той же пропорции, в какой уменьшается или увеличивается квадрат расстояния от притягивающего тела.

Было показано, что криволинейная траектория полета снаряда зависит от интенсивности земного притяжения и силы первоначального импульса или скорости выброса и может быть получена математическим путем. Точно так же, с помощью обратного процесса, когда мы знаем кривую, по которой движется снаряд, мы можем определить величину притягивающей силы, которая придает кривизну его траектории. Таким образом, исходя из наших знаний о кривизне орбиты Луны и скорости, с которой она движется, можно точно установить интенсивность притяжения, которое оказывает на нее земля. Сравнивая это с силой притяжения на поверхности Земли, обнаруживается, что последняя во столько раз

больше первой, насколько квадрат расстояния до Луны больше квадрата расстояния тела на поверхности Земли от ее центра.

(114.) Если бы это был единственный факт, который можно было бы привести для установления закона всемирного тяготения, то можно было бы подумать, что это случайная связь, не обязательно характеризующая притяжение. Однако при исследовании орбит и скоростей нескольких планет получается тот же результат. Обнаружено, что силы, с которыми они по отдельности притягиваются солнцем, велики ровно в той же пропорции, в какой малы квадраты нескольких чисел, выражающих их расстояния. Взаимное притяжение тел, находящихся на поверхности земли, друг к другу теряется из-за преобладающей силы, оказываемой землей на всех них. Тем не менее, в некоторых случаях этот эффект не только наблюдался, но и фактически измерялся.

Отвес при обычных обстоятельствах проходит в направлении, истинно вертикальном; но если он проходит вблизи большой массы вещества, например горы, было замечено, что он отклонен от истинной вертикали в сторону горы. Этот эффект наблюдался доктором Маскелином близ горы под названием Скаллиен в Шотландии и французскими астрономами близ Чимборако. Подробнее об этих наблюдениях читайте в нашем трактате по ГЕОДЕЗИИ.

Кавендишу удалось продемонстрировать эффекты взаимного притяжения металлических сфер. Два свинцовых шарика А, В, каждый около фута в диаметре, были расположены на определенном расстоянии друг от друга. Легкий стержень, к концам которого были прикреплены маленькие металлические шарики С, D, подвешивали в его центре Е на тонкой проволоке, и стержень размещали так, как показано на [фиг. 22](#), так что притяжение каждого из свинцовых шаров имело тенденцию поворачивать стержень вокруг центра Е в одном и том же направлении. Явное воздействие было произведено на шары С, D гравитацией сфер. В этом эксперименте необходимо следить за тем, чтобы к материалам шариков не примешивалось магнитное вещество.

Изложив до сих пор принципы, на которых основан закон всемирного тяготения, мы оставим этот предмет без дальнейших подробностей, поскольку он более точно относится к предмету ФИЗИЧЕСКОЙ АСТРОНОМИИ, к которой мы отсылаем читателя для полной демонстрации закона и детального развития его различных и важных следствий.

ГЛАВА VII.

ЗЕМНАЯ ГРАВИТАЦИЯ.

(115.) ГРАВИТАЦИЯ - это общее название, данное этому притяжению, какими бы массами материи оно ни проявлялось. Проявляясь в воздействии, оказываемом землей на окружающие тела, это называется "земной гравитацией".

Поскольку притяжение земли направлено к ее центру, можно было бы ожидать, что две линии отвеса должны казаться не параллельными, а настолько наклоненными друг к другу, что сходятся в точке под поверхностью земли. Таким образом, если AB и CD , [рис. 23](#), будут двумя линиями отвеса, каждая из которых будет направлена к центру O , где, если бы их направления были продолжены, они встретились бы. Аналогичным образом, если бы двум телам было позволено упасть из A и C , они бы опускались в направлениях AB и CD , которые сходятся к O . Наблюдение, напротив, показывает, что отвесы, подвешенные в местах, не очень удаленных друг от друга, действительно параллельны; и что тела, которым позволено падать, опускаются по параллельным линиям. Этот кажущийся параллелизм направления земного притяжения объясняется огромной пропорцией, которую величина земли имеет к расстоянию между двумя отвесами или двумя падающими телами, которые сравниваются. Если бы расстояние между точками B , D составляло 1200 футов, то наклон линий AB и CD не составлял бы четверти минуты или 240-й доли градуса. Но расстояние, в случаях, когда предполагается параллельность, никогда не превышает и редко бывает столь велико, как несколько ярдов; и, следовательно, наклон направлений AB и CD слишком мал, чтобы быть оцененным с помощью какой-либо практической меры. Следовательно, при исследовании явлений падения тел мы будем предполагать, что все частицы одного и того же тела притягиваются в параллельных направлениях, перпендикулярных горизонтальной плоскости.

(116.) Поскольку интенсивность земного притяжения увеличивается с уменьшением квадрата расстояния, можно было бы ожидать, что по мере приближения падающего тела к земле сила, ускоряющая его, должна постоянно возрастать, и, строго говоря, это так и есть. Но любая высота, с которой мы наблюдаем падение падающих тел, имеет столь малую пропорцию ко всему расстоянию от центра, что изменение интенсивности силы тяжести совершенно недоступно никаким практическим средствам ее оценки. Радиус, или расстояние от поверхности земли до ее центра, составляет 4000 миль. Теперь предположим, что тело опустилось на высоту полумили, расстояние, значительно превышающее то, которое используется в экспериментальных исследованиях, расстояния от центра в начале и конце падения тогда находятся в соотношении 8000 к 8001, и, следовательно, отношение силы притяжения в начале к силе в конце, равное квадратам этих чисел, составляет 64 000 000 к 64 016 001, что в целом при падении увеличивается примерно на одну часть к 4000; величина практически незначительная. Следовательно, при объяснении законов падения тел мы будем исходить из предположения, что на протяжении всего спуска тело приводится в движение силой одинаковой интенсивности.

Хотя сила, притягивающая все части одного и того же тела во время его спуска в данном месте, одинакова, все же сила тяжести в разных частях земной поверхности имеет разную интенсивность. Интенсивность уменьшается с увеличением широты, так что она больше к полюсам и меньше к экватору. Причины этого изменения, его закон и экспериментальные доказательства будут объяснены, когда мы будем рассматривать центробежную силу и движение маятников. Достаточно просто дать объявление об этом в этом месте.

(117.) Поскольку земное притяжение действует отдельно и одинаково на каждую частицу материи, независимо от природы или вида тела, из этого следует, что все тела, какого бы вида они ни были, или какова бы ни была их масса, должны двигаться с одинаковой скоростью. Если поместить две равные частицы вещества на определенном расстоянии над поверхностью земли, они будут падать по параллельным линиям и с точно такой же скоростью, потому что земля притягивает их одинаково. Точно так же тысячи частиц падали бы с одинаковыми скоростями. Теперь эти обстоятельства никоим образом не изменятся, если эти 1000 частиц, вместо того чтобы существовать отдельно, будут объединены в две твердые массы, одна из которых будет состоять из 990 частиц, а другая - из 10. Таким образом, у нас будет тяжелое тело и легкое, и, согласно нашим рассуждениям, они должны падать на землю с одинаковой скоростью.

Однако обычный опыт не всегда согласуется с этой доктриной. Наблюдается, что так называемые легкие вещества, такие как перья, сусальное золото, бумага и т. Д., Падают медленно и неравномерно, в то время как более тяжелые массы, такие как твердые куски металла, камни и т. Д., Падают быстро. Более того, существует немало случаев, когда земля, вместо того чтобы притягивать тела, кажется, отталкивает их, как в случае дыма, паров, воздушных шаров и других веществ, которые действительно поднимаются вверх. Мы должны учитывать, что масса Земли - не единственный фактор, участвующий в этих явлениях. Земля окружена атмосферой, состоящей из упругой или воздухообразной жидкости. Эта атмосфера обладает определенными свойствами, которые будут объяснены в нашем трактате о ПНЕВМАТИКЕ, и которые являются причинами упомянутых аномальных обстоятельств. Легкие тела поднимаются в атмосфере по той же причине, по которой кусок пробки поднимается со дна сосуда с водой; а другие легкие тела падают медленнее, чем тяжелые, по той же причине, по которой яйцо в воде опускается на дно медленнее, чем свинцовая пуля. В этом трактате не место давать прямое объяснение этим явлениям. Для нашей настоящей цели будет достаточно показать, что если бы не было атмосферы, все тела, тяжелые и легкие, падали бы с одинаковой скоростью. Это может быть легко достигнуто с помощью воздушного насоса. Удалив с помощью этого прибора воздух из высокого стеклянного сосуда, мы получаем возможность с помощью проволоки, проходящей герметично через отверстие в крышке, позволить нескольким телам упасть с верха сосуда на дно. Все это, будь то перья, бумага, сусальное золото, монеты и т. Д., опускается с одинаковой скоростью и ударяется о дно в один и тот же момент.

(118.) Каждый, кто видел, как тяжелое тело падает с высоты, был свидетелем того, что его скорость увеличивается по мере приближения к земле. Но если бы это не было заметно глазом, это было бы заметно по эффектам. Хорошо известно, что сила, с которой тело ударяется о землю, увеличивается с высотой, с которой оно упало. Эта сила, однако,

пропорциональна скорости, которую она имеет в момент соприкосновения с землей, и, следовательно, эта скорость увеличивается с высотой.

Когда наблюдения о притяжении, приведенные в последней главе, будут хорошо поняты, станет очевидно, что скорость, которую тело приобретает при падении с любой высоты, представляет собой совокупный эффект притяжения земной силы тяжести за все время падения. Каждое мгновение падения телу дается новый импульс, от которого оно получает дополнительную скорость; и его конечная скорость складывается из совокупности всех малых приращений скорости, которые передаются таким образом. Поскольку в настоящее время мы предполагаем, что интенсивность притяжения неизменна, из этого следует, что скорость, сообщаемая телу в каждый момент времени, будет одинаковой, и, следовательно, вся величина скорости, произведенная или накопленная в конце любого периода времени, пропорциональна продолжительности этого времени. Таким образом, если телу, падавшему в течение одной секунды, придать определенную скорость, то удвоенная скорость будет достигнута, когда оно падало в течение двух секунд, утроенная скорость за три секунды и так далее. Таков фундаментальный принцип или характеристика *равномерно ускоренного движения*.

(119.) При изучении обстоятельств падения тела время падения и скорость в каждый момент этого времени - не единственные вещи, на которые следует обратить внимание. Пространства, через которые он падает за определенные промежутки времени, отсчитываемые либо от начала его падения, либо от любой предполагаемой эпохи падения, являются не менее важными объектами исследования. Чтобы оценить пространство относительно времени и конечной скорости, мы должны учитывать, что это пространство перемещалось с разной скоростью. Из состояния покоя в начале падения скорость постепенно увеличивается со временем, и конечная скорость все еще больше, чем та, которую тело имело в любой предыдущий момент во время своего спуска. Следовательно, мы не можем *непосредственно* оценить пространство, пройденное в данном случае, по времени и конечной скорости. Но поскольку скорость равномерно увеличивается со временем, мы получим среднюю скорость, найдя ту, которая была у тела в середине интервала, прошедшего между началом и концом падения, и, таким образом, пространство, через которое тело фактически упало, является тем, через которое оно двигалось бы в то же время с равномерным сохранением этой средней скорости.

Но поскольку скорость, которую тело приобретает за любой промежуток времени, отсчитываемый от начала его спуска, пропорциональна этому времени, отсюда следует, что скорость тела по истечении половины всего времени спуска равна половине конечной скорости. Отсюда следует, что высота, с которой падает тело за любое предполагаемое время, равна пространству, через которое тело перемещалось бы за то же время с половиной конечной скорости, и, следовательно, равна половине пространства, которое было бы перемещено за то же время с конечной скоростью.

(120.) Из этого рассуждения следует, что между тремя величинами, высотой, временем и конечной скоростью, которые входят в исследование явлений падения тел, существуют два постоянных соотношения: *первое*, время, отсчитываемое от начала падения, и конечная скорость пропорциональны одно другому; так что по мере увеличения одной другая увеличивается в той же пропорции. *Во-вторых*, высота, равная половине пространства,

которое было бы пройдено за *время* падения с *конечной скоростью*, должна иметь фиксированную пропорцию к этим двум величинам, а именно. *время* и *конечная скорость* или должны быть пропорциональны произведению двух выражающих их чисел.

Но поскольку время всегда пропорционально конечной скорости, они могут быть выражены равными числами, и произведение равных чисел равно квадрату любого из них. Следовательно, произведение чисел, выражающих время, и конечной скорости эквивалентно квадрату числа, выражающего время, или квадрату числа, выражающего конечную скорость. Отсюда мы делаем вывод, что высота всегда пропорциональна квадрату времени падения или квадрату конечной скорости.

(121.) Использование нескольких математических символов сделает эти результаты более отчетливыми даже для студентов, не знакомых с математическими науками.

Пусть S = высота, с которой падает тело, выраженная в футах.

V = скорость в конце падения в футах в секунду.

T = количество секунд во время падения.

g = количество футов, через которые тело пролетело бы за одну секунду.

Отсюда следует, что скорость, полученная за одну секунду, будет равна $2g$, а скорость, полученная за T секунд, следовательно, будет равна $2g \times T$; так что

$$V = 2g \times T \quad [1]$$

Поскольку пространство, через которое тело проходит за T секунд, определяется путем умножения пространства, через которое оно проходит за одну секунду, на T^2 , мы получим

$$S = g \times T^2 \quad [2]$$

из чего в сочетании с [1] мы выводим

$S = V^2$
$4g$
$[3]$
$S =$
1
2
$V \times T \quad [4]$

С помощью этих формул, если известна высота, на которую тело свободно падает за одну секунду, можно вычислить высоту, на которую оно упадет за любое предполагаемое время. Поскольку высота пропорциональна квадрату времени, высота, с которой он упадет за *две* секунды, будет в *четыре* раза больше той, с которой он упадет за *одну* секунду. За *три* секунды он пролетит расстояние, в *девять* раз большее; за *четыре* секунды - *шестнадцать* раз; за *пять* секунд - *двадцать пять* раз, и так далее. Следовательно, следующее общее правило для определения высоты, с которой упадет тело за любой данный момент времени:

“Уменьшите данное время до секунд, возведите в квадрат количество секунд в нем и умножьте высоту, с которой тело падает за одну секунду, на это число; результатом будет искомая высота”.

В следующей таблице указаны высоты и соответствующее время с точностью до 10 секунд:

Время	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Высота	1	4	9	16	25	36	49	64	81	100

Каждая единица в числах первого ряда выражает секунду времени, а каждая единица во втором ряду выражает высоту, на которую тело свободно падает за секунду.

(122.) Если тело падает непрерывно в течение нескольких последовательных секунд, промежутки, через которые оно падает в каждую последующую секунду, имеют замечательное соотношение между собой, которое можно легко вывести из предыдущей таблицы. Если считать пространство, пройденное за первую секунду, неподвижным как наша единица измерения, то за первые две секунды будет пройдено в четыре раза больше пространства. Вычтите из этого 1 пространство, пройденное за первую секунду, а остаток 3 - это пространство, через которое тело падает за *вторую* секунду. Аналогичным образом, если 4, высота, пройденная за первые две секунды, будет вычтена из 9, высота, пройденная за первые три секунды, оставшиеся 5 будут пространством, пройденным за третью секунду. Чтобы найти пробел, провалившийся за четвертую секунду, вычтите 9, то есть пробел, провалившийся за первые три секунды, из 16, то есть пробел, провалившийся за первые четыре секунды, и в результате получите 7, и так далее. Таким образом, получается, что если пробел, пропущенный за первую секунду, будет называться 1, то пробелы, описанные во второй, третьей, четвертой, пятой и т.д. секундах, будут выражены нечетными числами соответственно, 3, 5, 7, 9, & с. Это представляет собой поразительную картину ускоренного движения падающего тела, при этом промежутки, проходимые за каждую последующую секунду, непрерывно увеличиваются.

(123.) Если скорость оценивать по пространству, через которое тело прошло бы равномерно за одну секунду, то конечная скорость тела, падающего в течение одной секунды, будет равна 2; ибо при такой конечной скорости тело за одну секунду преодолело бы вдвое большую высоту, с которой оно упало.

(124.) Поскольку конечная скорость увеличивается в той же пропорции, что и время, отсюда следует, что через две секунды она в два раза больше, чем через одну, а через три секунды в три раза больше, и так далее. Таким образом, в следующей таблице приведены конечные скорости, соответствующие времени спуска:

Время	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Конечная скорость	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20

Числа во втором ряду выражают промежутки, через которые тело с конечной скоростью прошло бы за одну секунду, причем единицей измерения, как обычно, является пространство, через которое тело свободно падает за одну секунду.

(125.) Таким образом, теоретически разработав законы, характеризующие падение тел, свободно падающих под действием силы тяжести или любой другой однородной силы того же рода, необходимо показать, как эти законы могут быть продемонстрированы реальным экспериментом. Существуют некоторые обстоятельства, сопутствующие падению тяжелых тел, которые затруднили бы, если не сделали невозможным, проиллюстрировать путем непосредственного наблюдения за этим феноменом свойства, которые были объяснены в этой главе. Тело, свободно падающее под действием силы тяжести, как мы докажем ниже, за одну секунду преодолевает высоту около 16 футов¹; следовательно, за две секунды оно пролетело бы вчетверо большее пространство, или 64 фута; за три секунды - в 9 раз большую высоту, или 144 фута; и за четыре секунды - в 256 футов. Следовательно, для того, чтобы иметь возможность наблюдать это явление всего четыре секунды, мы должны набрать высоту не менее 256 футов. Но далее: скорость в конце первой секунды была бы равна 32 футам в секунду; в конце второй секунды она составляла бы 64 фута в секунду; а ближе к концу падения она составляла бы около 120 футов в секунду. Очевидно, что такая высокая скорость была бы серьезным препятствием для точного наблюдения, даже несмотря на то, что мы были бы в состоянии контролировать необходимую высоту. Следовательно, число, выраженное через g в предыдущей формуле, равно $16 \cdot 083$.

Мистеру Джорджу Эттвуду, математику и натурфилософу прошлого столетия, пришло в голову, что все явления падения тел могут быть экспериментально продемонстрированы и точно наблюдаться, если сила того же рода, что и сила тяжести, а именно. можно использовать равномерно ускоряющую силу, но гораздо меньшей интенсивности; так что, пока движение продолжает управляться теми же законами, ее величина может быть настолько уменьшена, что конечная скорость, даже после многосекундного снижения, будет настолько умеренной, что допускает самое тщательное и точное наблюдение. После достижения этого не оставалось ничего другого, как найти высоту, с которой тело упадет за одну секунду, или, что то же самое, соотношение силы тяжести к уменьшенной, но равномерной ускоряющей силе, заменяющей ее таким образом.

(126.) Чтобы реализовать эту идею, Эттвуд сконструировал колесо, вращающееся на своей оси с очень небольшим трением и имеющее на кромке канавку для установки струны. Поверх этого колеса и в канавку он поместил тонкий шелковый шнур, к концам которого были прикреплены одинаковые цилиндрические грузики. Размещенные таким образом гири идеально уравнивают друг друга, и движения не происходит. Затем он добавил к одной из гирь небольшое количество, чтобы придать ей небольшой перевес. Теперь нагруженный груз начал опускаться, подтягивая с другой стороны разгруженный груз. Опускание нагруженного груза при этих обстоятельствах представляет собой движение точно такого же *вида*, как и опускание тяжелого тела, свободно падающего под действием силы тяжести; то есть оно увеличивается по тем же законам, хотя и с очень меньшей скоростью. Чтобы объяснить это, предположим, что нагруженный груз опускается из состояния покоя на один дюйм за секунду, он опустится на 4 дюйма за две секунды, на 9 дюймов за три, на 16 дюймов за четыре и так далее. Таким образом, за 20 секунд он

опустился бы на 400 дюймов, или 33 фута 4 дюйма, высоту, которой при необходимости можно было бы легко управлять.

Возможно, можно было бы подумать, что, поскольку грузы, подвешенные на концах нити, находятся в равновесии и, следовательно, не имеют тенденции ни перемещаться, ни сопротивляться движению, дополнительный груз, помещенный на один из них, должен опускаться так же быстро, как если бы ему позволили падать свободно и без связи с ними. Совершенно верно, что этот груз получит от притяжения земли ту же силу, когда будет помещен на один из подвешенных грузиков, что и если бы он был отсоединен от них; но в последствиях, которые из этого вытекают, есть это различие. Если бы он не был связан с подвешенными грузами, вся сила, воздействующая на него, была бы затрачена на ускорение его спуска; но поскольку он связан с равными грузами, которые поддерживают друг друга в равновесии, шелковым шнуром, проходящим через колесо, сила, воздействующая на добавленный груз, расходуется не как раньше, на придание скорости только добавленному грузу, но и ему вместе с двумя равными грузами, прикрепленными к веревке, один из которых опускается вместе с добавленным грузом, а другой поднимается на противоположной стороне колеса. Следовательно, исключая любой эффект, производимый самим колесом, скорость спуска должна быть уменьшена как раз пропорционально увеличению массы, между которой должно быть распределено прилагаемое усилие; и, следовательно, *скорость* падения соотносится со скоростью тела, падающего свободно, в той же пропорции, в какой добавленный вес соотносится с суммой масс равных подвешенных грузов и добавленного веса. Таким образом, чем меньше добавленный вес и чем больше равные подвешенные грузы, тем медленнее будет скорость спуска.

Для удобства наблюдения обстоятельств падения используется вертикальная шахта (см. [рис. 24.](#)) обычно устанавливается позади опускающегося груза. Эта стойка разделена на дюймы и половинки и, конечно, при необходимости может быть еще более точной градуировкой. Ступенька для приема падающего груза может перемещаться на этой стойке и может быть зафиксирована в любом предложенном положении с помощью регулировочного винта. Секундный маятник, биение которого должно быть очень хорошо слышно, помещается рядом с наблюдателем. Поскольку, таким образом, нагруженный груз может опускаться в течение любого предполагаемого времени или с любой требуемой высоты, все обстоятельства спуска могут быть точно соблюдены, и несколько законов, уже объясненных в этой главе, могут быть экспериментально проверены.

(127.) Законы, управляющие падением тел под действием силы тяжести, будучи обращенными вспять, будут применимы и к подъему тел, выброшенных вверх. Если тело спроецировать прямо вверх с любой заданной скоростью, оно поднимется на высоту, с которой должно было упасть, чтобы приобрести эту скорость. Притяжение земли в этом случае постепенно лишит тело скорости, которая сообщается ему в момент его проецирования. Следовательно, это будет явление *замедленного движения*. На каждом этапе своего подъема он будет иметь ту же скорость, которую имел бы, если бы спускался в то же место с самой высокой точки, до которой он поднимается. Отсюда ясно, что все подробности, относящиеся к восхождению тел, могут быть немедленно выведены из подробностей их нисхождения, и поэтому этот предмет не требует дальнейшего рассмотрения.

Чтобы завершить исследование феномена падающих тел, теперь осталось бы только объяснить метод определения точной высоты, на которую тело могло бы опуститься за одну секунду, если бы ему не оказывала сопротивления атмосфера или какая-либо другая возмущающая причина. Однако, поскольку решение этой проблемы требует помощи принципов, которые еще не объяснены, его следует пока отложить.

ГЛАВА VIII.

О ДВИЖЕНИИ ТЕЛ По НАКЛОННЫМ ПЛОСКОСТЯМ И КРИВЫМ.

(128.) В предыдущей главе мы исследовали явления свободного падения тел в вертикальном направлении и определили законы, управляющие не только их движением, но и движением тел, движимых какой бы то ни было равномерно ускоряющей силой. Теперь мы рассмотрим некоторые из наиболее обычных случаев, когда свободное падение тел затруднено и действие их гравитации изменено.

(129.) Если тело, подталкиваемое какими бы то ни было силами, поместить на твердую неподатливую поверхность, оно, очевидно, останется в покое, если равнодействующая [\(76\)](#) всех приложенных к нему сил будет направлена перпендикулярно поверхности. В этом случае производимым эффектом является давление, но движения не происходит. Если на тело будет действовать только одна сила, оно останется в состоянии покоя при условии, что направление этой силы перпендикулярно поверхности.

Но эффект будет иным, если равнодействующая сил, приложенных к телу, будет наклонена к поверхности. В таком случае эта равнодействующая, которая для простоты может быть принята за единую силу, может рассматриваться как механически эквивалентная двум силам [\(76\)](#), одной в направлении поверхности, а другой перпендикулярно к ней. Последнему элементу будет оказано сопротивление, и он создаст давление; первый заставит тело двигаться. Это, возможно, будет более четко понято с помощью диаграммы.

Пусть AB , [рис. 25](#),- поверхность, и пусть P - частица вещества, помещенная на нее и подталкиваемая силой в направлении PD , перпендикулярном AB . Очевидно, что эта сила может только прижать частицу P к AB , но не может придать ей никакого движения.

Но давайте предположим, что сила, которая толкает P , находится в направлении Pf , наклонном к AB . Принимая Pf за диагональ параллелограмма, сторонами которого являются Pd и Pc [\(74\)](#), сила Pf механически эквивалентна двум силам, выраженным линиями Pd и Pc . Но Pd , будучи перпендикулярным AB , создает давление без движения, а Pc , находясь в направлении AB , производит движение без давления. Таким образом, действие силы Pf распределяется между движением и давлением в определенной пропорции, которая зависит от наклона ее направления к направлению поверхности. Существуют два крайних случая: 1. Когда он находится в направлении поверхности; тогда он производит движение без давления; и 2. Когда он перпендикулярен поверхности; тогда он производит давление без движения. Однако во всех промежуточных направлениях это приведет к обоим этим эффектам.

(130.) Будет совершенно очевидно, что чем более наклонным будет направление силы Pf к AB , тем больше будет та ее часть, которая производит движение, и тем меньше будет та, которая производит давление. Это станет очевидным при просмотре [рис. 26](#). На этом рисунке линия Pf , представляющая силу, равна Pf на [рис. 25](#). Но Pd , который выражает давление, меньше на [рис. 26](#) чем на [рисунке. 25](#), в то время как Pc , выражающий движение, больше. Таким образом, до тех пор, пока наклон направлений поверхности и сила остаются

неизменными, до тех пор распределение силы между движением и давлением будет оставаться неизменным; и, следовательно, если сама сила остается неизменной, ее части, которые производят движение и давление, будут соответственно равны.

(131.) После понимания этих общих принципов не может возникнуть никаких трудностей в применении их к движению тел, движимых по наклонным плоскостям или кривым под действием силы тяжести. Если тело поместить на неподатливую горизонтальную плоскость, оно останется в состоянии покоя, создавая давление на плоскость, равное общей величине его веса. Ибо в этом случае сила, приводящая в движение тело, будучи силой земного притяжения, направлена вертикально и, следовательно, перпендикулярна горизонтальной плоскости.

Но если тело P , [рис. 25](#), быть помещенным на плоскость Ab , наклонную к направлению силы тяжести, тогда, согласно тому, что было доказано [\(129\)](#), вес тела будет распределен на две части, Pc и Pd ; одна, Pd , создает давление на плоскость Ab , а другая, Pc , вызывает движение вниз по плоскости. Поскольку наклон перпендикулярного направления Pf груза к направлению плоскости Ab должен быть одинаковым, в какой бы части плоскости груз ни был размещен, из [\(130\)](#) следует, что пропорция Pc веса, которая толкает тело вниз по плоскости, должна быть одинаковой на протяжении всего его спуска.

(132.) Отсюда легко можно заключить, что сила, направленная вниз по плоскости, равномерна; ибо, поскольку вес тела P всегда одинаков и поскольку его пропорция к той части, которая толкает его вниз по плоскости, одинакова, из этого следует, что количество этой части не может изменяться. Таким образом, движение тяжелого тела вниз по наклонной плоскости является равномерно ускоренным движением и характеризуется всеми свойствами равномерно ускоренного движения, объясненными в предыдущей главе.

Поскольку Pf представляет силу тяжести, то есть силу, с которой тело свободно опускалось бы в вертикальном направлении, а Pc - силу, с которой оно движется вниз по плоскости, отсюда следует, что тело свободно падало бы в вертикальном направлении из P в F в то же время, как в плоскости оно перемещалось бы из P в C . Следовательно, таким образом, когда известна высота, на которую тело упало бы вертикально, можно немедленно определить пространство, через которое оно опустилось бы за то же время по любой данной наклонной плоскости. Для пусть AB , [рис. 25](#), - заданная наклонная плоскость, и пусть Pf - пространство, через которое тело пролетело бы за одну секунду. Из F проведите Fc перпендикулярно плоскости, а пространство Pc - это то, через которое тело P упадет за одну секунду на плоскость.

(133.) По мере увеличения угла BAH , который измеряет высоту плоскости, увеличивается и наклон вертикального направления Pf относительно плоскости. Следовательно, согласно тому, что было доказано [\(130\)](#), из этого следует, что по мере увеличения высоты плоскости сила, толкающая тело вниз по плоскости, также увеличивается, а по мере уменьшения высоты сила соответственно уменьшается. Два крайних случая: 1. Когда плоскость поднимается до тех пор, пока она не станет перпендикулярной, и в этом случае грузу разрешается свободно падать, не оказывая никакого давления на плоскость; и 2. Когда плоскость опускается до тех пор, пока она не станет горизонтальной, и в этом случае поддерживается весь вес, и движения нет.

Из этих обстоятельств следует, что с помощью наклонной плоскости мы можем получить равномерно ускоряющую силу любой величины, меньшей, чем сила тяжести.

Мы здесь опустили и будем опускать в настоящее время во всех случаях эффекты *трения*, из-за которых движение вниз по плоскости замедляется. Сначала исследовав механические свойства тел, предположительно свободных от трения, мы рассмотрим трение отдельно и покажем, как оно влияет на настоящие результаты.

(134.) Ускоряющие силы на разных наклонных плоскостях можно сравнить по принципу, описанному в (131). Давайте [инжир. 25.](#) и 26. будут двумя наклонными плоскостями, и возьмем равными линии Pf на каждом рисунке, обе выражающие силу тяжести, тогда Pc будет силой, которая в каждом случае толкает тело вниз по плоскости.

Поскольку сила, действующая на наклонную плоскость, меньше силы, побуждающей тело свободно падать в вертикальном направлении, пространство, через которое тело должно падать, чтобы достичь определенной конечной скорости, должно быть ровно настолько больше, насколько меньше ускоряющая сила. Исходя из этого принципа, мы сможем определить конечную скорость при спуске через любое пространство на плоскости по сравнению с конечной скоростью, достигнутой при свободном падении в вертикальном направлении. Предположим, что тело P , [рис. 27.](#), помещено в верхнюю часть плоскости, и от H проведите перпендикуляр HC . Если Bh представляет силу притяжения, Bc будет представлять силу, действующую на плоскость [\(131\)](#). Для того чтобы тело, движущееся вниз по плоскости, имело конечную скорость, равную скорости тела, свободно падающего из точки B в точку H , необходимо, чтобы оно двигалось из точки B вниз по плоскости через пространство, которое имеет такое же отношение к Bh , какое Bh имеет к Bc . Но поскольку треугольник AbH во всех отношениях подобен HbC , только выполнен в большем масштабе, линия Ab имеет такое же отношение к Bh , какое Bh имеет к Bc . Следовательно, при падении по наклонной плоскости из B в A конечная скорость такая же, как и при свободном падении из B в H .

Очевидно, что то же самое будет верно на любом уровне, на котором будет проведена горизонтальная линия. Таким образом, если IK горизонтальный, то конечная скорость падения на плоскости от B до I будет такой же, как конечная скорость свободного падения от B до K .

(135.) Движение тяжелого тела вниз по кривой в важном отношении отличается от движения вниз по наклонной плоскости. Поскольку каждая часть плоскости одинаково наклонена к вертикали, действие силы тяжести в направлении плоскости равномерно; и, следовательно, явления подчиняются всем установленным законам равномерно ускоренного движения. Если, однако, мы предположим, что линия Ba , по которой опускается тело P , изогнута, как показано на [рис. 28.](#), наклон его направления в разных частях к направлению Pf силы тяжести, очевидно, будет различным. В данном случае этот наклон больше по направлению к B и меньше по направлению к A , и, следовательно, часть силы тяжести, которая придает движение телу, больше по направлению к B , чем по направлению к A [\(130\)](#). Следовательно, сила, приводящая в движение тело, вместо того чтобы быть равномерной, как в наклонной плоскости, здесь постепенно уменьшается. Скорость этого уменьшения полностью зависит от природы кривой и может быть выведена из свойств кривой с помощью математических рассуждений. Детали такого исследования, однако, не носят достаточно элементарного характера, чтобы их можно было с пользой ввести в этот

трактат. Поэтому мы должны ограничиться объяснением таких результатов, которые могут оказаться необходимыми для развития других разделов науки.

(136.) Доказано, что когда тяжелое тело перемещается вниз по наклонной плоскости под действием силы тяжести, плоскость выдерживает давление, возникающее из-за определенной части веса Pd , [рис. 25](#), который действует перпендикулярно плоскости. Это также имеет место при движении вниз по кривой, такой как Ba , [рис. 28](#). В этом случае также весь вес распределяется между той частью, которая направлена вниз по кривой, и той, которая, будучи перпендикулярной кривой, оказывает на нее давление. Существует, однако, другая причина, которая оказывает давление на кривую и которая не действует в случае наклонной плоскости. Благодаря свойству инерции, когда тело приводится в движение в любом направлении, оно должно упорно двигаться в этом направлении, если только его не отклонит от него действующая сила. При движении вниз по наклонной плоскости направление никогда не меняется, и поэтому благодаря своей инерции падающее тело постоянно сохраняет все движение, оказываемое на него, в том же направлении; но когда оно опускается по кривой, его направление постоянно меняется, и сопротивление кривой является причиной отклонения, кривая должна выдерживать давление, равное той силе, которая, таким образом, была бы способна постоянно отклонять тело от прямолинейной траектории, по которой оно двигалось бы в силу своей инерции. Это давление полностью зависит от кривизны траектории, по которой вынуждено двигаться тело, и от его инерции и, следовательно, совершенно не зависит от веса и фактически существовало бы, если бы вес не действовал.

(137.) Это давление получило название *центробежной силы*, поскольку оно демонстрирует тенденцию движущегося тела *вылетать из* центра кривой, по которой оно перемещается. Его количество также зависит от скорости движения и кривизны траектории, по которой перемещается тело. Поскольку окружности могут быть описаны с любой степенью кривизны в соответствии с длиной радиуса или расстоянием от их окружности до их центра, из этого следует, что какой бы ни была кривая, по которой движется тело, всегда можно назначить окружность, которая имеет ту же кривизну, что и в любой предполагаемой точке данной кривой. Такая окружность называется “окружностью кривизны” в этой точке кривой; и поскольку все кривые, кроме окружности, изменяют свою степень кривизны в разных точках, из этого следует, что разные части одной и той же кривой будут иметь разные окружности кривизны. Очевидно, что чем больше радиус окружности, тем меньше ее кривизна: таким образом, окружность с радиусом AB , [рис. 29](#), является более изогнутой, чем тот, радиус которого равен Cd , и это в точной пропорции радиуса Cd к радиусу AB . Радиус окружности кривизны для любой части кривой называется “радиусом кривизны” этой части.

(138.) Центробежное давление увеличивается с увеличением радиуса кривизны; но оно также зависит от скорости, с которой движущееся тело поворачивается вокруг центра круга кривизны. Эта скорость оценивается либо по фактическому пространству, через которое движется тело, либо по *угловой скорости* линии, проведенной от центра окружности к движущемуся телу. Это тело несет с собой один конец этой линии, в то время как другой остается закрепленным в центре. По мере увеличения этого углового поворота вокруг центра увеличивается центробежное давление. Чтобы оценить скорость, с которой

изменяется это давление в целом, необходимо умножить квадрат числа, выражающего угловую скорость, на квадрат, выражающий радиус кривизны, и сила увеличивается в той же пропорции, что и полученное таким образом произведение.

(139.) Мы наблюдали, что те же самые причины, которые оказывают давление на связанное тело, будут вызывать движение, если тело будет свободным. Соответственно, если тело будет перемещено какой-либо действующей причиной по кривой, оно под действием центробежной силы *отлетит*, и движущая сила, с которой оно, таким образом, будет удаляться от центра, вокруг которого оно вращается, будет мерой центробежной силы. На основе этого принципа было сконструировано устройство, называемое *вращающимся столом*, с целью демонстрации экспериментальных иллюстраций законов центробежной силы. Эта машина позволяет размещать любые предлагаемые грузы на любых заданных расстояниях от центров, вокруг которых они вращаются, либо с одинаковой угловой скоростью, либо со скоростями, имеющими определенную пропорцию. Нити, прикрепленные к вращающимся грузам, подводятся к центрам, вокруг которых они соответственно вращаются, и там, проходя через шкивы, соединяются с грузами, которые можно менять по своему усмотрению. Когда вращающиеся грузы вылетают из своих соответствующих центров, под действием центробежной силы они поднимают грузы, прикрепленные к другим концам нитей, и величина центробежной силы оценивается по весу, который она способна поднять.

С помощью этого прибора могут быть проведены следующие эксперименты:—

Пример 1. Одинаковые грузы, вращаемые с одинаковой скоростью на равных расстояниях от центра, поднимают одинаковый вес и, следовательно, обладают одинаковой центробежной силой.

Пример 2. Равные грузы, вращаемые с одинаковой угловой скоростью на расстояниях от центра в пропорции один к двум, будут поднимать грузы в той же пропорции. Следовательно, центробежные силы находятся в такой пропорции.

Пример 3. Равные веса, вращаемые на равных расстояниях с угловыми скоростями, равными одному к двум, поднимут веса как один к четырем, то есть как квадраты угловых скоростей. Следовательно, центробежные силы находятся в такой пропорции.

Пример 4. Равные веса, вращаемые на расстояниях от двух до трех с угловыми скоростями от одного до двух, поднимут веса от двух до двенадцати; то есть как произведения расстояний два и три и квадратов один и четыре угловых скоростей. Следовательно, центробежные силы находятся в такой пропорции.

Центробежная сила также должна увеличиваться по мере увеличения массы перемещаемого тела; ибо, подобно притяжению, каждая частица движущегося тела подвергается ее отдельному и равному воздействию. Следовательно, двойная масса, движущаяся на то же расстояние и с той же скоростью, будет обладать двойной силой. Следующий эксперимент подтверждает это:—

Пример 5. Если гири, равные одному к двум, вращать на равных расстояниях с одинаковой скоростью, они поднимут гири, равные одному к двум.

Закон, управляющий центробежной силой, может быть тогда кратко выражен общими символами следующим образом:—

Пусть c = центробежная сила, с которой перемещается груз весом в один фунт. вращение по кругу за одну секунду, радиус которого равен одному футу, подействовало бы на веревку, соединяющую его с центром. Сила, с которой он воздействовал бы на струну длиной R футов, была бы $c \times R$; и если бы вместо вращения за одну секунду он вращался за T секунд, сила была бы

$$c \times R$$

$$T^2$$

;

и если бы вращающаяся масса составляла w фунтов. сила была бы

$$C =$$

$$c \times W \times R$$

$$T^2$$

.

Эта формула включает в себя всю теорию центробежной силы.

Но можно показать, что число, выраженное через c , равно 1.226, и, следовательно,

$$C =$$

$$1.226 \times W \times R$$

$$T^2$$

.

Часто удобнее использовать количество оборотов, сделанных за данное время, чем время одного оборота. Пусть N затем выразит количество оборотов, или долю оборота, совершенного за одну секунду, и мы получим

$$T =$$

$$1$$

$$N$$

.

Следовательно

$$C = 1.226 \times W \times R \times N^2.$$

(140.) Рассмотрение центробежной силы доказывает, что если наблюдается движение тела по криволинейной траектории, то должна существовать какая-то действенная причина, препятствующая его отлету и заставляющая его вращаться вокруг центра. Если тело соединено с центром нитью, шнуром или стержнем, то под действием центробежной силы нитка, шнур или стержень натягиваются. Если на выпуклой стороне траектории поместить

неподатливую изогнутую поверхность, то сила будет оказывать давление на эту поверхность. Но если наблюдается, что тело движется по кривой без какой-либо видимой материальной связи со своим центром и без каких-либо препятствий на выпуклой стороне его пути, препятствующих его отступлению, как в случае с движениями планет вокруг Солнца и спутников вокруг планет, обычно приписывают причину притяжению тела, занимающего центр: в данном случае этим телом является солнце, и принято говорить, что *притяжение* Солнца, нейтрализующее действие центробежной силы планет, *удерживает их* на их орбитах. В другом месте мы уже обращались к неточному и нефилософскому стилю этой фразеологии, в которой допускаются термины, указывающие не только на неизвестную причину, но и на ее место и намекающие на что-то из ее природы. Все, что мы вправе заявить в данном случае, это то, что планете постоянно передается движение; что это движение направлено к солнцу; что оно противодействует центробежной силе; но откуда исходит это движение, будь то свойство, присущее солнцу, или свойство среды или пространства, в котором находятся и солнце, и планеты, или какое-либо другое влияние может быть его непосредственной причиной, мы совершенно не знаем.

(141.) Можно привести многочисленные примеры воздействия центробежной силы.

Если поместить камень или другой груз в пращу, которую вращают рукой в направлении, перпендикулярном земле, камень не выпадет из пращи, даже когда он находится в верхней точке своего круга и, следовательно, не имеет под собой опоры. Центробежная сила, в данном случае действующая от руки, которая является центром вращения, больше веса тела и, следовательно, предотвращает его падение.

Подобным образом стакан с водой можно вращать так быстро, что даже когда горлышко стакана направлено вниз, вода все равно будет удерживаться в нем центробежной силой.

Если ведро с водой подвешивать на нескольких нитях, и эти нити скручивать, поворачивая ведро много раз в одном и том же направлении, позволяя шнурам раскручиваться, ведро будет быстро вращаться, и можно будет наблюдать, как вода поднимается по бокам и опускается в центре из-за центробежной силы, с которой оно выталкивается из центра. Этот эффект может пойти так далеко, что вся вода перельется и ведро останется почти пустым.

(142.) Экипаж, или всадник, или пешеход, проезжая угол, движется по кривой и подвергается воздействию центробежной силы, которая увеличивается со скоростью и которая воздействует на тело силой, направленной из-за угла. Животное заставляет свой вес сопротивляться этой силе, добровольно наклоняя свое тело в сторону угла. В этом случае пусть AB , [рис. 30](#), быть телом; Cd - направление веса, перпендикулярное земле, а Cf - направление центробежной силы, параллельное земле и *исходящее* из-за угла. Корпус Ab наклонен к углу, так что диагональная сила [\[74\]](#), которая механически эквивалентна весу и центробежной силе, должна быть направлена в направлении Ca и, следовательно, должна создавать давление ног на землю.

С увеличением скорости увеличивается и центробежная сила, и поэтому для противодействия ей необходим больший наклон тела. Соответственно, мы обнаруживаем, что чем быстрее поворачивается угол, тем больше животное наклоняет к нему свое тело.

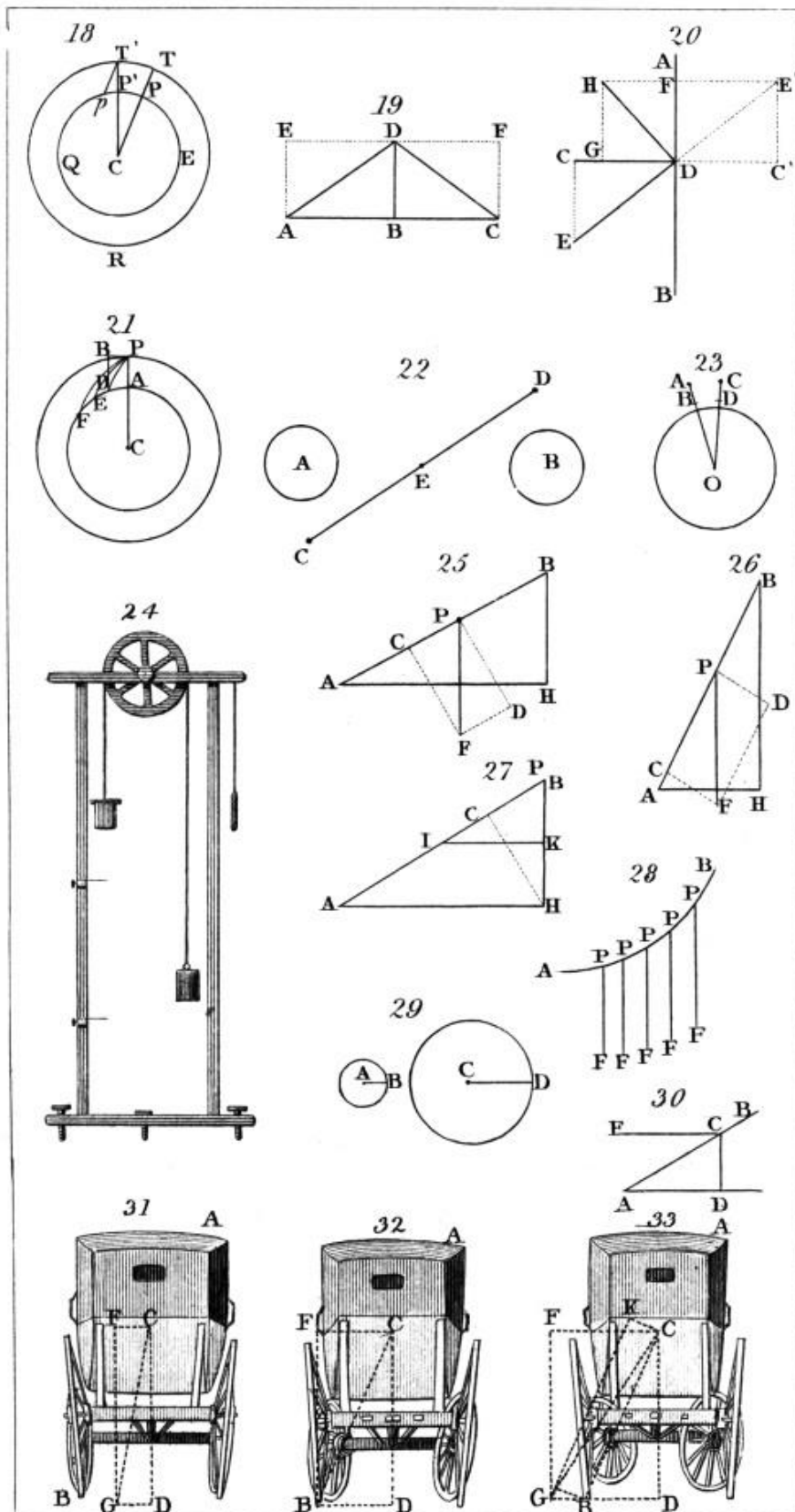
Однако тележка, не имеющая произвольного движения, не может компенсировать возмущающую силу, возникающую при постепенном изменении направления движения;

следовательно, при определенных обстоятельствах она будет переворачиваться, падая, конечно, наружу или из угла. Если $A B$ - каретка, а C , [рис. 31](#), место, в котором в основном собирается груз, эта точка C будет находиться под воздействием двух сил: веса, который может быть представлен перпендикуляром Cd , и центробежной силы, которая будет представлена линией Cf , которая должна иметь такое же отношение к Cd , какое центробежная сила имеет к весу. Теперь совокупное действие этих двух сил будет таким же, как действие единственной силы, представленной $C G$. Таким образом, давление тележки на дорогу приближается к внешнему колесу B . Если центробежная сила находится в той же пропорции к весу, что и Cf (или Db), [рис. 32](#), при приближении к $C D$ все давление оказывается на колесо B .

Если центробежная сила относится к весу в большей пропорции, чем Db имеет к Cd , то линия Cf , которая ее представляет, [рис. 33](#), будет больше, чем $D B$. Диагональ Cg , которая представляет собой совокупное воздействие веса и центробежной силы, в этом случае будет проходить за пределами колеса B , и, следовательно, этой результирующей величине не будет оказано сопротивления. Чтобы понять, насколько сильно она будет стремиться опрокинуть каретку, пусть сила Cg разделится на две: одну в направлении Cb , а другую Ck , перпендикулярную Cb . Первому Cb будет сопротивляться дорога, но второй Ck будет стремиться поднять тележку над внешним колесом. Если скорость и кривизна траектории будут сохраняться в течение достаточного времени, чтобы позволить этой силе Ck поднять груз, так что линия направления упадет на B , тележка будет опрокинута.

Из вышесказанного очевидно, что вероятность опрокидывания при этих обстоятельствах зависит от соотношения Bd к Cd , или, что то же самое, от расстояния между колесами и высоты основного места размещения груза. В следующей главе будет показано, что существует определенная точка, называемая центром тяжести, в которой, как можно предположить, сосредоточен весь вес транспортного средства и его груза. Это тот момент, который в настоящем исследовании мы отметили C . Следовательно, безопасность перевозки зависит от величины расстояния между колесами и малой высоты центра тяжести над дорогой, поскольку любое из этих обстоятельств или оба эти обстоятельства увеличат соотношение Bd и $C D$.

(143.) В конном трюке, демонстрируемом на ринге в амфитеатре, когда лошадь движется по кругу с исполнителем, стоящим в седле, и лошадь, и всадник постоянно наклоняются к центру ринга, и наклон увеличивается со скоростью движения: за счет этого наклона их веса противодействуют действию центробежной силы, точно так же, как в уже упомянутом случае ([142](#).)



Х. Адлард, Шотландия

Лондон, издательство Longman & Co.

(144.) Если телу позволить упасть под действием своего веса вниз по выпуклой поверхности, такой как А В, [рис. 34.](#), он продолжал бы двигаться по поверхности до тех пор, пока не достигнет точки В, если бы не действие центробежной силы: это, придавая ему движение от центра кривой, заставит его выйти из кривой в определенной точке С, которую можно легко найти с помощью математических вычислений.

(145.) Наиболее замечательное и важное проявление центробежной силы наблюдается в эффектах, производимых вращением земли вокруг своей оси. Пусть окружность на [рис. 35.](#) обозначьте участок земли, А В - ось, вокруг которой она вращается. Это вращение заставляет материю, составляющую массу земли, вращаться по кругам вокруг различных точек оси как центров на различных расстояниях, на которых расположены составные части этой массы. Поскольку все они вращаются с одинаковой угловой скоростью, на них будут действовать центробежные силы, которые будут больше или меньше пропорционально тому, больше или меньше их расстояния от центра. Следовательно, части земли, расположенные около экватора, D, будут подвергаться более сильному воздействию центробежной силы, чем части, расположенные вокруг полюсов, А В. Результатом этого различия стало то, что составляющая материя вокруг экватора на самом деле была смещена дальше от центра, чем составляющая материя вокруг полюсов, так что фигура земли раздулась по бокам и кажется пропорционально вдавленной сверху и снизу, напоминая форму апельсина. Преувеличенное изображение этой фигуры приведено на [рис. 36.](#); реальная разница между расстояниями полюсов и экватора от центра слишком мала, чтобы быть заметной на диаграмме. Точное соотношение Са к Сd еще никогда не было точно установлено. По некоторым наблюдениям, Сd превышает Са на

1

277,

и другие только

1

333

. Последнее, однако, представляется более вероятным. Можно считать, что оно входит в указанные пределы.

Та же причина сильнее действует на другие планеты, которые быстрее вращаются вокруг своих осей. Юпитер и Сатурн имеют значительно более эллиптическую форму.

(146.) Центробежная сила вращения земли также воздействует на отдельные тела на ее поверхности. Если бы такие тела не удерживались на поверхности земным притяжением, они были бы немедленно отброшены вращательным движением, в котором они участвуют. Центробежная сила, однако, действительно уменьшает воздействие земного притяжения на эти тела или, что то же самое, уменьшает их вес. Если бы земля не вращалась вокруг своей оси, вес тел во всех местах, одинаково удаленных от центра, был бы одинаковым; но это не так, когда тела движутся вместе с землей. Под действием центробежной силы они приобретают тенденцию отклоняться от оси, которая увеличивается по мере удаления от этой оси и, следовательно, больше, чем ближе они к экватору, и меньше, когда они приближаются к полюсу. Но есть и другая причина, по которой центробежная сила более эффективна в противодействии, которое она оказывает силе тяжести вблизи экватора, чем

вблизи полюсов. Эта сила действует не из центра земли, а направлена от земной оси. Следовательно, она не противостоит силе тяжести напрямую, за исключением самого экватора. Покидая экватор и продвигаясь к полюсам, она все меньше и меньше противодействует силе тяжести, как будет ясно при рассмотрении [рис. 35](#), где все линии P_c представляют направление силы тяжести, а линии P_f представляют направление центробежной силы.

Поскольку, таким образом, по мере продвижения от экватора к полюсам не только величина центробежной силы постоянно уменьшается, но и она действует все меньше и меньше вопреки силе тяжести, из этого следует, что массы тел больше всего уменьшаются из-за нее на экваторе и в меньшей степени по направлению к полюсам.

Поскольку тела обычно взвешивают, уравнивая их по отношению к другим телам известного веса, можно спросить, как явления, которые мы только что описали, могут быть установлены на самом деле? ибо каким бы ни было тело, относительно которого оно может быть уравновешено, это тело должно страдать от такого же уменьшения веса, как и любое другое, и, следовательно, при уменьшении всех в той же пропорции равновесие будет сохранено, даже если изменить веса.

Чтобы сделать этот эффект наблюдаемым, необходимо будет сравнить действие силы тяжести с каким-нибудь явлением, на которое не влияет центробежная сила вращения земли и которое будет одинаковым в любой части земли. Способы достижения этой цели будут объяснены в следующей главе.

ГЛАВА IX.

ЦЕНТР ТЯЖЕСТИ.

(147.) Под действием земного притяжения все частицы, составляющие массу тела, притягиваются равными силами в параллельных направлениях вниз. Если бы эти составляющие частицы располагались просто рядом, без какой-либо механической связи, сила, воздействующая на любую из них, никоим образом не могла бы повлиять на другие, и массу в таком случае рассматривали бы как совокупность мелких частиц материи, каждая из которых приводится в движение независимой силой. Но тела, которые являются объектами исследования в механике, не находятся в таком состоянии. Твердые тела представляют собой когерентные массы, частицы которых прочно связаны друг с другом, так что любая сила, воздействующая на одно из них, видоизменяясь в зависимости от обстоятельств, будет передаваться через все тело. Жидкости приспосабливаются к форме поверхностей, на которых они покоятся, и силы, воздействующие на какую-либо одну часть, передаются на другие способом, зависящим от особых свойств этого класса тел.

Поскольку все тела на поверхности Земли, являющиеся объектами механических исследований, должны постоянно подвергаться воздействию земной силы тяжести, желательно получить какой-нибудь простой и обобщающий метод оценки воздействия этой силы. Рассмотрение этого, как неизбежно в первом случае, совместного действия бесконечного числа равных и параллельных сил, толкающих элементарные молекулы вниз, было бы сопряжено с явными неудобствами. Бесконечное число сил и бесконечное деление массы составляли бы части любой механической проблемы.

Чтобы преодолеть эту трудность и добиться всей легкости и простоты, которых можно пожелать при элементарных исследованиях, необходимо только определить некоторую силу, единичное действие которой будет эквивалентно совокупному воздействию гравитации всех молекул тела. Если это удастся осуществить, то эта единственная сила может быть введена во все задачи для представления всего эффекта земного притяжения, и не нужно обращать внимания ни на какие частицы тела, кроме тех, на которые действует эта сила.

(148.) Чтобы обнаружить такую силу, если она существует, мы сначала выясним, какие свойства обязательно должны ее характеризовать. Пусть $A B$, [рис. 37](#).- твердое тело, расположенное вблизи поверхности земли. Все его частицы направляются вниз, в направлениях, обозначенных стрелками. Теперь, если существует какая-либо отдельная сила, эквивалентная этим комбинированным воздействиям, ей могут быть сразу присвоены два свойства: 1. Она должна быть направлена вниз, в общем направлении тех сил, которым она механически эквивалентна; и 2. она должна быть равна по интенсивности их сумме, или, что то же самое, силе, с которой опускалась бы вся масса. Затем мы предположим, что она имеет такую интенсивность и направление стрелки $D E$. Теперь, если единая сила в направлении $D e$ эквивалентна всем отдельным притяжениям, которые воздействуют на частицы, мы можем предположить, что все эти притяжения устранены, и на тело $A b$

воздействует только одно притяжение, действующее в направлении D E. Из этого следует, что если тело поместить на опору непосредственно под направлением линии De или подвесить к неподвижной точке непосредственно над ее направлением, оно останется неподвижным. Поскольку вся притягивающая сила в направлении De в одном случае прижмет тело к опоре, а в другом случае создаст натяжение шнура, стержня или любого другого используемого средства подвески.

(149.) Но предположим, что тело было подвешено в некоторой точке P, а не в направлении линии D E. Пусть Pс - направление нити, на которой подвешено тело. Весь его вес, согласно принятому нами предположению, должен тогда действовать в направлении C E. Принимая Cf за представление веса; его можно рассматривать как механически эквивалентный двум силам (74), Ci и Ch. Из них Ch, действующая непосредственно из точки P, просто оказывает на нее давление и придает натяжение шнуру Pс; но Ci, действуя под прямым углом к Ср, производит движение вокруг P как центра и в направлении Ci, к вертикальной линии Pg, проведенной через точку P. Если бы тело Ab находилось по другую сторону линии Pg, оно двигалось бы таким же образом по направлению к ней и, следовательно, в направлении, противоположном его нынешнему движению.

Следовательно, мы должны заключить, что когда тело подвешено к неподвижной точке, оно не может оставаться в состоянии покоя, если эта неподвижная точка не расположена в направлении линии De; и, с другой стороны, что если неподвижная точка находится в направлении этой линии, оно не может двигаться. Таким образом, предлагается практический тест, с помощью которого можно сразу обнаружить линию De. Пусть к любой точке тела прикрепят нитку и подвешивают ее на этой нитке к крючку или другой неподвижной точке. Направление нити, когда тело становится неподвижным, будет направлением единой силы, эквивалентной притяжению всех составных частей массы.

(150.) Здесь предлагается провести исследование: зависит ли направление эквивалентной силы, определенное таким образом, от положения тела относительно поверхности земли, и как изменение этого положения влияет на направление эквивалентной силы? Этот вопрос можно сразу решить, если подвешивать тело за разные точки и определять направления, которые принимает подвешивающая нить в каждом случае, относительно фигуры и размеров исследуемого тела.

Подвешивая тело таким образом к любой точке, просверлите в нем небольшое отверстие точно в направлении нити, чтобы, если продолжить нить ниже точки, где она прикреплена к телу, она проходила бы через это отверстие. Тело последовательно подвешивают за несколько различных точек на его поверхности, просверлив в нем таким же образом как можно больше маленьких отверстий. Если затем тело разрезать насквозь, чтобы обнаружить направления, которые приняли несколько отверстий, то будет обнаружено, что все они пересекают друг друга в одной точке внутри тела; или тот же факт может быть обнаружен следующим образом: тонкая проволока, которая почти заполняет отверстия, будучи пропущенной через любое из них, будет обнаружено, что она перекрывает прохождение аналогичной проволоки через любое другое.

Этот исключительный факт учит нас тому, что действительно может быть доказано математическими рассуждениями без эксперимента, а именно тому, что в каждом теле есть одна точка, через которую должна проходить единственная сила, эквивалентная

притяжению всех его частиц, в каком бы положении ни находилось тело. Эта точка называется *центром тяжести*.

(151.) В каком бы положении ни находилось тело, центр тяжести будет иметь тенденцию опускаться в направлении линии, перпендикулярной горизонту, и которая называется *линией направления* веса. Если тело совершенно свободно и не ограничено каким-либо сопротивлением или препятствием, центр тяжести фактически опустится в этом направлении, а все остальные точки тела будут двигаться с той же скоростью в параллельных направлениях, так что во время его падения положение частей тела относительно земли не изменится. Но если тело, как это обычно бывает, подвергается некоторому сопротивлению или ограничению, оно либо останется неподвижным, поскольку его вес будет расходоваться на вызывающее давление на ограничивающие точки или поверхности, либо оно будет двигаться в направлении и со скоростью, зависящей от обстоятельств, которые его ограничивают.

Чтобы определить эти эффекты, предсказать давление, создаваемое весом, если тело находится в состоянии покоя, или смешанные эффекты движения и давления, если это не так, необходимо во всех случаях иметь возможность определить место расположения центра тяжести. Когда известны величина и форма тела, а также плотность вещества, занимающего его размеры, местоположение центра тяжести может быть определено с наибольшей точностью путем математических вычислений. Процесс, посредством которого это достигается, однако, не носит достаточно элементарного характера, чтобы быть должным образом представленным в этом трактате. Чтобы сделать его понятным, потребовалась бы помощь некоторых из самых передовых аналитических принципов; и даже выразить положение рассматриваемого вопроса, за исключением очень частных случаев, было бы невозможно без помощи специальных символов.

(152.) Существуют определенные формы тел, у которых, когда они равномерно плотны, место центра тяжести может быть легко определено и доказано рассуждениями, которые в целом понятны; но во всех случаях, независимо от того, где они находятся, это место может быть легко определено экспериментально.

(153.) Если равномерно плотное тело имеет такую форму, что по обе стороны от него можно найти точку, материалы тела которой во всех направлениях вокруг него распределены одинаково, то эта точка, очевидно, будет центром тяжести. Ибо, если его поддерживать, то притяжению частиц с одной стороны, тянущему их вниз, противостоит воздействие точно такого же рода и равной величины с противоположной стороны, и таким образом тело остается сбалансированным на острие.

Самым замечательным телом такого рода является земной шар, центром которого, очевидно, является его центр тяжести.

Фигура, такая как [рис. 38](#), называемый *сплюснутым сфероидом*, имеет центр тяжести в своем центре С. Такова фигура земли. То же самое можно наблюдать в отношении эллиптического тела, [рис. 39](#), которое называется *вытянутым сфероидом*.

Куб и некоторые другие правильные твердые тела, ограниченные плоскими поверхностями, имеют внутри себя точку, подобную описанной выше, которая, следовательно, является их центром тяжести. Таковы [рис. 40](#).

Прямая палочка одинаковой толщины имеет центр тяжести в центре своей длины; а цилиндрическое тело имеет центр тяжести в своем центре, в середине своей длины или оси. Такова точка С, [рис. 41](#).

Плоская пластина из любого однородного материала, имеющая во всех частях одинаковую толщину, имеет центр тяжести в середине своей толщины и под точкой своей поверхности, которая определяется ее формой. Если она круглая или эллиптическая, то эта точка является ее центром. Если она имеет какую-либо правильную форму, ограниченную прямыми краями, то это та точка, которая одинаково удалена от нескольких ее углов, как показано на [рис. 42](#).

(154.) Есть некоторые случаи, в которых, хотя расположение центра тяжести не так очевидно, как в только что приведенных примерах, все же его можно обнаружить без какого-либо математического процесса, который нелегко понять. Предположим, что ABC , [рис. 43](#), представляет собой плоскую треугольную пластину одинаковой толщины и плотности. Представим, что он разделен на узкие полосы линиями, параллельными стороне AC , как показано на рисунке. Нарисуйте BD от угла B до средней точки D стороны AC . Нетрудно понять, что BD разделит поровну все столбики, на которые предполагается разделить треугольник. Теперь, если плоскую треугольную пластину ABC поместить в горизонтальное положение на прямой, совпадающей с линией BD , она будет сбалансирована: поскольку стержни, параллельные AC , будут по отдельности уравновешены краем непосредственно под их средней точкой; поскольку эта средняя точка является центром тяжести каждого стержня. Поскольку, таким образом, треугольник балансирует на ребре, центр тяжести должен находиться где-то непосредственно над ним и, следовательно, внутри пластины в некоторой точке под линией BD .

Те же рассуждения докажут, что центр тяжести пластины находится под линией Ae , проведенной от угла A к средней точке E стороны BC . Чтобы понять это, необходимо только рассмотреть треугольник, разделенный на полосы, параллельные BC , и, следовательно, показать, что он будет уравновешен на ребре, расположенном под $A E$. Поскольку тогда центр тяжести пластины находится под линией Bd , а также под Ae , он должен находиться под точкой G , в которой эти линии пересекаются; и, соответственно, он находится на глубине под G , равной половине толщины пластины.

Это можно проверить экспериментально, взяв кусок жести или картона и придав ему треугольную форму. Точка G найдена путем рисования Bd и Ae , которые делят две стороны поровну, и она будет уравновешена, если ее поместить на острие булавки в точке G .

Определив таким образом центр тяжести треугольника, мы сможем найти положение центра тяжести любой пластины одинаковой толщины и плотности, ограниченной прямыми краями, как будет показано ниже. ([173](#).)

(155.) Центр тяжести не всегда входит в объем тела, то есть не ограничен его поверхностями. Этому можно привести множество примеров. Если кусок проволоки согнуть в любую форму, центр тяжести редко будет находиться в проволоке. Предположим, что ему придана форма кольца. В этом случае центром тяжести проволоки будет центр окружности,

точка, не образующая никакой части самой проволоки: тем не менее можно доказать, что эта точка обладает характерным свойством центра тяжести; ибо, если кольцо подвешено за какую-либо точку, центр кольца всегда должен располагаться под точкой подвешивания. Если бы можно было предположить, что этот центр соединен с кольцом очень тонкими нитями, вес которых был бы незначителен и которые могли бы быть соединены узлом или иным образом в центре, кольцо было бы уравновешено на точке, расположенной под узлом.

Аналогичным образом, если проволоке придать форму эллипса или любой другой кривой, аналогично расположенной вокруг центральной точки, эта точка будет ее центром тяжести.

(156.) Для экспериментального определения центра тяжести может быть использован метод, описанный в (149, 150). В этом случае для определения этого будет достаточно двух точек подвешивания, поскольку направления подвесного шнура, проходящего через тело, будут пересекаться в центре тяжести. Эти направления также можно определить, поместив тело на острый выступ и отрегулировав его таким образом, чтобы оно балансировало на нем. В этом случае линия, проведенная через тело прямо вверх от точки, будет проходить через центр тяжести, и, следовательно, две такие линии должны пересекаться в этой точке.

(157.) Если тело имеет две плоские параллельные поверхности, такие как листовой металл, жесткая бумага, открытки, доска и т.д., центр тяжести можно определить, уравновесив тело в двух положениях на горизонтальном прямом ребре. Точка, в которой линии, отмеченные ребром, пересекаются друг с другом, будет находиться непосредственно под центром тяжести. Это можно проверить, показав, что кузов будет балансировать в точке, установленной таким образом, или что если он подвешен, то определенная таким образом точка всегда будет находиться под точкой подвешивания.

Положение центра тяжести таких тел можно также определить, поместив тело на горизонтальный стол с прямым краем. Тело перемещается за край до тех пор, пока оно не окажется в таком положении, при котором малейшее возмущение приведет к его падению, после чего центр тяжести сразу же окажется над краем. Поскольку это делается в двух положениях, центр тяжести будет определен, как и раньше.

(158.) Уже говорилось, что когда тело совершенно свободно, центр тяжести обязательно должен перемещаться вниз, в направлении, перпендикулярном горизонтальной плоскости. Когда тело несвободно, обстоятельства, которые его сдерживают, обычно позволяют центру тяжести перемещаться в определенных направлениях, но препятствуют его движению в других. Таким образом, если тело подвешено к неподвижной точке с помощью гибкого троса, центр тяжести может свободно перемещаться во всех направлениях, за исключением тех, которые унесли бы его дальше от точки подвешивания, чем на длину троса. Следовательно, если мы представим себе шар или сферу, окружающую точку подвешивания со всех сторон на расстоянии, равном расстоянию центра тяжести от точки подвешивания, то, когда шнур полностью натянут, центр тяжести будет свободно перемещаться во всех направлениях внутри этой сферы.

Существует бесконечное множество обстоятельств, при которых движение тела может быть ограничено и при которых возникает наиболее важный и полезный класс механических проблем. Прежде чем мы обратим внимание на другие, мы, однако, более подробно рассмотрим то, что только что было описано.

Пусть P , [рис. 44](#) - точка подвешивания, а C - центр тяжести, и предположим, что тело расположено таким образом, что C должно находиться внутри уже описанной сферы. Таким образом, шнур будет ослаблен, и в этом состоянии тело будет свободно. Таким образом, центр тяжести будет опускаться в перпендикулярном направлении до тех пор, пока шнур не станет полностью натянутым; тогда натяжение предотвратит его дальнейшее движение в перпендикулярном направлении. Направленную вниз силу теперь следует рассматривать как диагональ параллелограмма и эквивалентную двум силам Cd и Ce в направлениях сторон, как уже объяснялось в [\(149\)](#). Сила Cd переместит центр тяжести в направлении Pf , перпендикулярном точке подвешивания. Поскольку сила тяжести постоянно действует на C при его приближении к Pf , он будет двигаться к этой линии с ускоренной скоростью, и когда он достигнет ее, он приобретет силу, которой немедленно не противостоит никакое препятствие, и, следовательно, благодаря своей инерции он сохраняет эту силу и перемещается за пределы Pf с другой стороны. Но когда точка C попадает на линию Pf , она оказывается в самом низком возможном положении, поскольку находится в самой нижней точке сферы, которая ограничивает ее движение. Следовательно, когда он переходит на другую сторону Pf , он должен начать подниматься, и сила тяжести, которая в первом случае ускорила его спуск, теперь по той же причине и с равной энергией будет противодействовать его подъему. Это будет легко понять. Пусть C' - любая точка, которой он мог достичь при восхождении; $C'G'$, сила тяжести, теперь эквивалентна $C'D'$ и $C'E'$. Последнее, как и прежде, создает напряжение; но первое $C'D'$ находится в направлении, непосредственно противоположном движению, и поэтому замедляет его. Это замедление будет продолжаться до тех пор, пока все движения, приобретенные телом при спуске из первого положения, не будут уничтожены, и тогда оно начнет возвращаться в Pf , и таким образом оно будет продолжать вибрировать из стороны в сторону до тех пор, пока трение о точку P и сопротивление воздуха постепенно не лишат его движения и не приведут в состояние покоя в направлении Pf .

Если бы не влияние трения и атмосферного сопротивления, тело продолжало бы вечно одинаково колебаться из стороны в сторону от линии Pf .

(159.) Только что описанный феномен является лишь примером обширного класса. Всякий раз, когда обстоятельства, ограничивающие тело, таковы, что центру тяжести не разрешается опускаться ниже определенного уровня, но, с другой стороны, не запрещается подниматься выше него, тело останется в покое, если центр тяжести будет установлен на самом низком пределе его уровня; любое возмущение заставит его колебаться вокруг этого состояния, и оно не сможет вернуться в состояние покоя до тех пор, пока трение или какая-либо другая причина не лишат его движения, сообщаемого возмущающей силой.

(160.) При обстоятельствах, которые мы только что описали, тело не могло бы поддерживать себя в состоянии покоя ни в каком положении, кроме того, в котором центр тяжести находится в самой нижней точке пространства, в котором оно свободно перемещаться. Это, однако, не всегда так. Предположим, что он был подвешен на негибком стержне вместо гибкой струны; тогда центр тяжести не только не мог бы удаляться от точки подвешивания, но и приближаться к ней; фактически, он всегда удерживался бы на одном и том же расстоянии от нее. Таким образом, вместо того, чтобы быть способным перемещаться в любом месте сферы, теперь он способен перемещаться только по ее поверхности. Рассуждения, использованные в последнем случае, могут быть применены и

здесь, чтобы доказать, что когда центр тяжести находится по обе стороны от перпендикуляра Pf , он будет падать в направлении Pf и колебаться, и что если его поместить на линию Pf , он останется в равновесии. Но в этом случае существует другое положение, в котором центр тяжести может быть размещен таким образом, чтобы обеспечить равновесие. Если его поместить в самую высокую точку сферы, в которой оно движется, то вся действующая на него сила будет направлена на точку подвешивания перпендикулярно вниз и будет полностью израсходована на создание давления на эту точку; следовательно, тело в этом случае будет находиться в равновесии. Но это состояние равновесия по своему характеру сильно отличается от того, при котором центр тяжести находился в самой нижней части сферы. В данном случае любое смещение центра тяжести, каким бы незначительным оно ни было, перенесет его на более низкий уровень, и тогда сила тяжести предотвратит его возвращение в прежнее состояние и будет толкать его вниз, пока он не достигнет самой нижней точки сферы, и вокруг этой точки он будет колебаться.

(161.) Два состояния равновесия, которые были только что отмечены, называются устойчивым и неустойчивым равновесием. Характер первого таков, что любое нарушение состояния вызывает колебания относительно него; но любое нарушение последнего состояния приводит к полному ниспровержению и, наконец, вызывает колебания вокруг состояния устойчивого равновесия.

Пусть $A B$, [рис. 45](#). - эллиптическая доска, опирающаяся своим краем на горизонтальную плоскость. В представленном здесь положении, когда точка опоры находится на конце P меньшей оси, доска находится в устойчивом равновесии; поскольку любое движение с любой стороны должно приводить к тому, что центр тяжести C поднимается в направлении Co , и возникает колебание. Если, однако, он опирается на меньший конец, как показано на [рис. 46](#), положение все еще было бы состоянием равновесия, потому что центр тяжести находится прямо над точкой опоры; но это было бы неустойчивое равновесие, потому что малейшее смещение центра тяжести привело бы к его опусканию.

Таким образом, яйцо или лимон могут быть закреплены на конце, но малейшее нарушение равновесия опрокинет их. Напротив, он будет легко ложиться набок, и любое возмущение вызовет колебание.

(162.) Когда обстоятельства, в которых находится тело, позволяют центру тяжести перемещаться только по горизонтальной линии, тело находится в состоянии, которое можно назвать *нейтральным равновесием*. Малейшая сила сдвинет центр тяжести, но не вызовет колебаний и не опрокинет тело, как в последних двух случаях.

Примером такого состояния является цилиндр, расположенный на горизонтальной плоскости. Когда цилиндр катится по плоскости, центр тяжести C , [рис. 47](#), движется по прямой, параллельной плоскости Ab , и удаленной от нее на радиус цилиндра. Таким образом, тело будет безразлично находиться в любом положении, потому что линия направления всегда проходит через точку P , в которой тело покоится на плоскости.

Если бы плоскость была наклонной, как показано на [рис. 48](#), тело может иметь такую форму, что при его вращении центр тяжести будет перемещаться горизонтально. В этом случае тело безразлично покоилось бы на любой части плоскости, как если бы оно было

горизонтальным, при условии, что трение было достаточным для предотвращения скольжения тела вниз по плоскости.

Если центр тяжести цилиндра случайно не совпадает с его центром из-за неоднородности материалов, из которых он состоит, он не будет находиться в состоянии нейтрального равновесия в горизонтальной плоскости, как показано на [фиг. 47](#). В этом случае пусть G , [рис. 49](#), будет центром тяжести. В представленном здесь положении, когда центр тяжести находится непосредственно *ниже* центра C , состояние будет устойчивым равновесием, потому что движение в любую сторону приведет к поднятию центра тяжести; но на [фиг. 50](#), где G находится непосредственно над C , состояние неустойчивого равновесия, потому что движение в любую сторону заставило бы G опуститься, и тело повернулось бы в положение, указанное на [рис. 49](#).

(163.) Цилиндр такого типа при определенных обстоятельствах будет катиться по наклонной плоскости. Пусть AB , [рис. 51](#), быть наклонной плоскостью, и пусть цилиндр будет расположен так, чтобы линия направления от G была *выше* точки P , в которой цилиндр опирается на плоскость. Весь вес тела, действующий в направлении Gd , очевидно, заставит цилиндр катиться в направлении A , при условии, что трение будет достаточным для предотвращения скольжения; но хотя цилиндр в этом случае поднимается, центр тяжести G действительно опускается.

Когда точка G расположена так, что линия направления Gd должна падать на точку P , цилиндр будет находиться в равновесии, потому что его вес действует на точку, на которой он покоится. На [рис. 52](#) *представлены два случая*, и [рис. 53](#), в котором G занимает эту позицию. *Рис. 52.* представляет состояние стабильно, а [рис. 53](#) неустойчивого равновесия.

(164.) Когда тело помещается на основание, его устойчивость зависит от положения направляющей линии и высоты центра тяжести над основанием. Если линия направления проходит внутри основания, тело будет стоять твердо; если оно упадет на край основания, оно будет в состоянии, при котором малейшая сила опрокинет его на ту сторону, на которую падает линия направления; и если линия направления проходит вне основания, тело должно перевернуться через тот край, который ближе всего к линии направления.

На [рис. 54](#) и [рис. 55](#), линия направления Gp проходит внутри основания, и очевидно, что тело будет стоять твердо; ибо любая попытка перевернуть его через любой край приведет к тому, что центр тяжести поднимется. Но на [рис. 56](#) линия направления проходит по краю, и если тело перевернуть, центр тяжести немедленно начинает опускаться. Однако до тех пор, пока его не перевернут, центр тяжести поддерживается краем.

На [рис. 57](#) линия направления выходит за пределы основания, центр тяжести имеет тенденцию опускаться от точки G к точке A , и тело, соответственно, будет падать в этом направлении.

(165.) Когда линия направления проходит внутри основания, тела всегда будут стоять твердо, но не с одинаковой степенью устойчивости. Как правило, устойчивость зависит от высоты, на которую должен быть поднят центр тяжести, прежде чем тело сможет быть опрокинуто. Чем больше эта высота, тем большей в той же пропорции будет устойчивость.

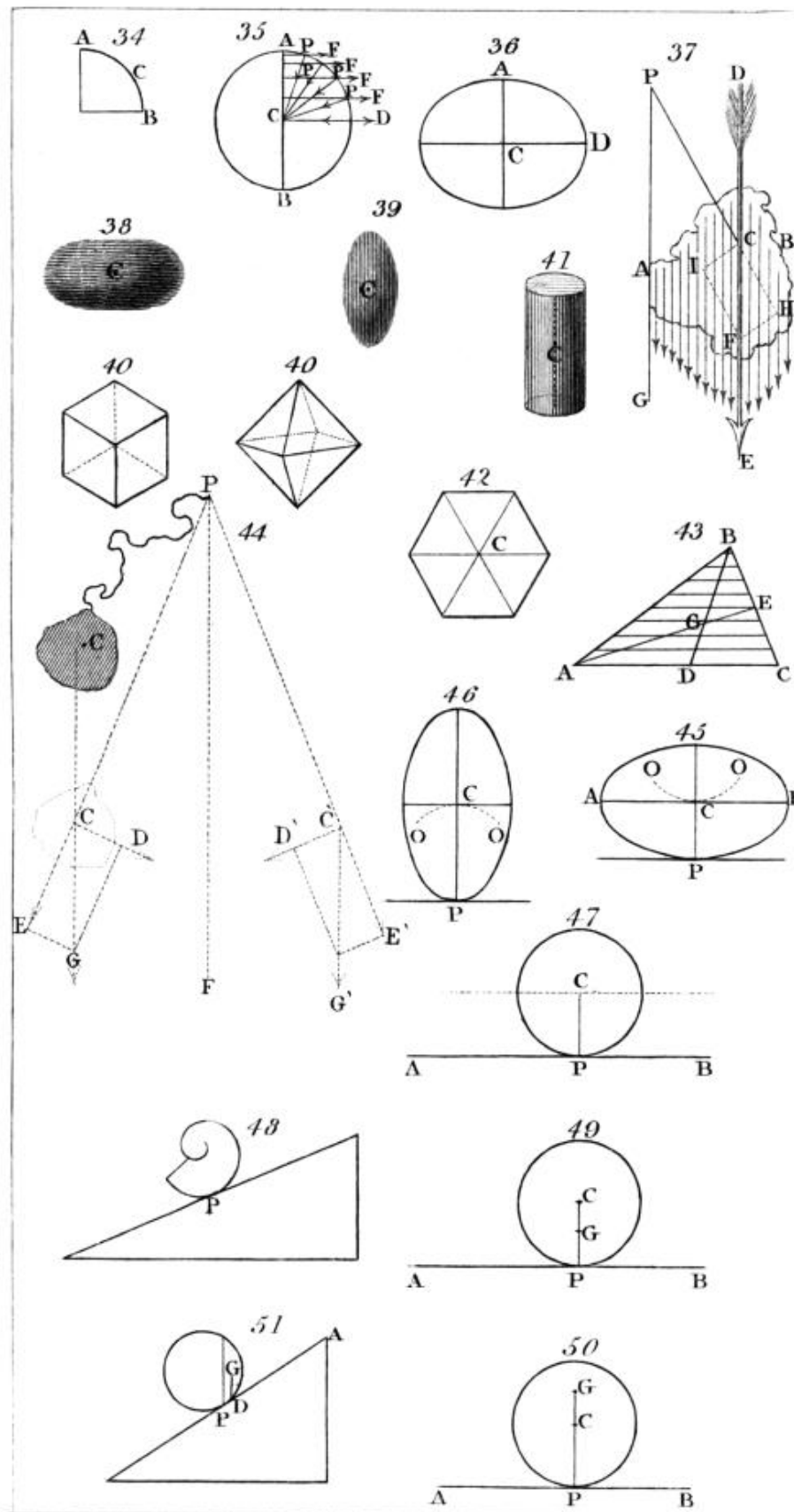
Пусть $В А С$, [рис. 58](#) - пирамида, центр тяжести которой находится в точке G . Чтобы перевалить его через край $В$, центр тяжести должен быть перенесен через арку Ge и, следовательно, поднят на высоту $Н Е$. Если бы, однако, пирамида была выше относительно своего основания, как показано на [рис. 59](#), высота $Не$ была бы пропорционально меньше; и если бы основание было очень маленьким по отношению к высоте, как на [рис. 60](#), высота $Не$ была бы очень маленькой, и небольшое усилие перебросило бы его через край $В$.

Очевидно, что одни и те же наблюдения могут быть применены ко всем фигурам, какие бы они ни были, только что сделанные выводы зависят только от расстояния направляющей линии от края основания и высоты центра тяжести над ним.

(166.) Отсюда мы можем понять принцип, от которого зависит устойчивость груженных вагонов. Когда груз размещается на значительной высоте над колесами, центр тяжести повышается, и тележка становится пропорционально ненадежной. Поэтому в междугородных автобусах, предназначенных для перевозки пассажиров, багаж иногда размещается под кузовом; легкие крупногабаритные свертки могут быть безнаказанно размещены сверху.

Когда центр тяжести тележки сильно поднят, существует значительная опасность опрокидывания, если резко и быстро поворачивать за угол; поскольку центробежная сила, действующая при этом на центр тяжести, легко поднимет его на небольшую высоту, необходимую для поворота тележки через внешние колеса [\(142\)](#).

(167.) Одна и та же фура будет обладать большей устойчивостью при загрузке тяжелого вещества, занимающего небольшое пространство, такого как металл, чем при перевозке того же веса более легкого вещества, такого как сено; потому что центр тяжести в последнем случае будет намного выше.



Х. Адлард, Шотландия

Лондон, издательство Longman & Co.

Если большой стол поставить на единственную ножку в центре, будет практически невозможно обеспечить его устойчивость; но если столб, на который он опирается, заканчивается треногой, он будет обладать такой же устойчивостью, как если бы у него были три ножки, прикрепленные к точкам прямо над местами, где опираются ножки треноги.

(168.) Когда твердое тело опирается более чем на одну точку, для его устойчивости необязательно, чтобы линия направления приходилась на одну из этих точек. Если имеется только две точки опоры, то линия направления должна проходить между ними. Тело в этом случае поддерживается так эффективно, как если бы оно опиралось на ребро, совпадающее с прямой линией, проведенной от одной точки опоры к другой. Если имеются три точки опоры, которые не расположены на одной прямой, тело будет поддерживаться таким же образом, как это было бы при помощи основания, совпадающего с треугольником, образованным прямыми линиями, соединяющими три точки опоры. Точно так же, каким бы ни было количество точек, на которых может покоиться тело, его виртуальное основание будет найдено, предположив, что проведены прямые линии, соединяющие несколько точек последовательно. Когда линия направления попадает в это основание, тело всегда будет стоять твердо, а в остальном - нет. Степень устойчивости определяется таким же образом, как если бы основание представляло собой сплошную поверхность.

(169.) Необходимость и опыт учат животное приспосабливать свои позы и движения к положению центра тяжести своего тела. Когда человек стоит, линия направления его веса должна проходить в пределах основания, образованного его ступнями. Если $A B, C D$, [рис. 61.](#) являются ногами, то этим основанием является пространство $A B D C$. Очевидно, что чем больше пальцы его ног вывернуты наружу, тем более сжатым будет основание в направлении $E f$, и тем больше вероятность того, что он упадет назад или вперед. Кроме того, чем ближе его ступни друг к другу, тем более сжатым будет основание в направлении $G h$, и тем больше вероятность того, что он упадет в любую сторону.

Когда человек ходит, ноги попеременно отрываются от земли, а центр тяжести либо не поддерживается, либо перебрасывается из стороны в сторону. Тело также немного наклоняется вперед, чтобы тенденция центра тяжести опускаться в направлении пальцев ног могла способствовать мышечному действию в продвижении тела. Этот наклон тела вперед увеличивается со скоростью движения.

Если бы не гибкость коленного сустава, ходьба давалась бы гораздо тяжелее, чем она есть на самом деле, поскольку центр тяжести с каждым шагом поднимался бы все выше. Линия движения центра тяжести при ходьбе представлена на [рис. 62.](#) и лишь незначительно отклоняется от правильной горизонтальной линии, так что высота центра тяжести может изменяться очень незначительно. Но если бы не было коленного сустава, как у человека с деревянными ногами, центр тяжести переместился бы, как показано на [рис. 63.](#), так что при каждом шаге вес тела поднимался бы на значительную высоту, и, следовательно, труд при ходьбе значительно увеличивался.

Если человек стоит на одной ноге, линия направления его веса должна проходить в пределах пространства, на которое ступает его нога. Малость этого пространства по сравнению с высотой центра тяжести объясняет трудность этого подвига.

Положение центра тяжести тела меняется в зависимости от позы и положения конечностей. Если рука вытянута с одной стороны, центр тяжести оказывается ближе к этой стороне, чем это было, когда рука висела перпендикулярно. Когда танцоры, стоя на одной ноге, вытягивают другую под прямым углом к ней, они должны наклонять тело в направлении, противоположном тому, в котором вытянута нога, чтобы перенести центр тяжести на стопу, которая их поддерживает.

Когда носильщик несет груз, его положение должно регулироваться центром тяжести его тела и груза вместе взятых. Если бы он нес груз на спине, линия направления прошла бы за пределы его пяток, и он упал бы навзничь. Чтобы перенести центр тяжести на ноги, он соответственно наклоняется вперед, [рис. 64](#).

Если медсестра несет ребенка на руках, она откидывается назад по той же причине.

Когда груз переносится на голове, носильщик стоит прямо, чтобы центр тяжести находился над его ногами.

При подъеме на холм кажется, что мы наклоняемся вперед, а при спуске - откидываемся назад, но на самом деле мы стоим прямо относительно ровной плоскости. Это необходимо для сохранения линии направления между стопами, как видно из [рис. 65](#).

Человек, сидящий на стуле без спинки, не может подняться с него, не наклонившись вперед, чтобы перенести центр тяжести на ступни, или не отведя ступни назад, чтобы подвести их под центр тяжести.

Четвероногий никогда не поднимает обе лапы с одной и той же стороны одновременно, поскольку тогда центр тяжести окажется без поддержки. Пусть $A B C D$, [рис. 66](#), будут ногами. Основание, на котором он стоит, имеет форму $A B C D$, а центр тяжести находится почти над точкой O , где диагонали пересекаются друг с другом. Ноги A и C подняты вместе, центр тяжести поддерживается ногами B и D , поскольку он находится между ними; и когда B и D подняты, он аналогичным образом поддерживается ногами A и C . Центр тяжести, однако, часто на мгновение остается без поддержки, поскольку нога B отрывается от земли до того, как на нее наступает A , что ясно из наблюдения за следами лошадиных копыт, отметиной существа A на ноге B . При более быстрых шагах всех животных центр тяжести через определенные промежутки времени не поддерживается.

Трюки канатоходцев - это эксперименты по управлению центром тяжести. Выяснилось, что эволюции исполнителя облегчаются тем, что он держит в руке тяжелый шест. Его безопасность в этом случае зависит не от центра тяжести его тела, а от центра тяжести его тела и шеста, взятых вместе. Эта точка находится недалеко от центра шеста, так что фактически можно сказать, что он держит в руках точку, от положения которой зависит легкость его подвигов. Без помощи шеста центр тяжести находился бы внутри туловища, и его положение не могло бы быть приспособлено к обстоятельствам с такой же легкостью и быстротой.

(170.) Центр тяжести массы жидкости - это та точка, которая обладала бы свойствами, которые, как было доказано, присущи центру тяжести твердого тела, если бы жидкость затвердевала без какого-либо изменения количества или расположения ее частей. Эта точка также обладает другими свойствами по отношению к жидкостям, которые будут исследованы в ГИДРОСТАТИКЕ и ПНЕВМАТИКЕ.

(171.) Центром тяжести двух тел, удаленных друг от друга, является та точка, которая обладала бы свойствами, приписываемыми центру тяжести, если бы два тела были соединены негибкой линией, весом которой можно было бы пренебречь. Математически найти эту точку - очень простая задача. Пусть A и B , [рис. 67](#) - два тела, а a и b - их центры тяжести. Проведите правильную линию ab и разделите ее на C таким образом, чтобы отношение aC к bC было таким же, как отношение массы тела B к массе тела A .

Это можно легко проверить экспериментально. Пусть A и B - два тела, вес которых значителен по сравнению с весом соединяющего их стержня ab . Пусть тонкая шелковая бечевка с прикрепленными к ней концами будет подвешена на булавку; и на ту же булавку пусть будет подвешен отвес. В каком бы положении ни были подвешены тела, можно заметить, что линия отвеса будет пересекать стержень ab в одной и той же точке, и эта точка разделит линию ab на части aC и bC , которые находятся в пропорции массы B к массе A .

(172.) Центр тяжести трех отдельных тел определяется таким же образом, как и центр тяжести двух, и может быть найден, сначала определив центр тяжести двух; а затем предположив, что их массы сосредоточены в этой точке так, что образуют одно тело, и найдя центр тяжести этого и третьего.

Таким же образом может быть определен центр тяжести любого количества тел.

(173.) Если пластина одинаковой толщины ограничена прямыми краями, ее центр тяжести можно определить, разделив ее на треугольники диагональными линиями, как на [рис. 68](#), и, определив с помощью [\(154\)](#) центры тяжести нескольких треугольников, центром тяжести всей пластины будет их общий центр тяжести, найденный, как указано выше.

(174.) Хотя центр тяжести получил свое название от известных свойств, которыми он обладает по отношению к отдельным телам незначительной величины, расположенным на поверхности земли или вблизи нее, все же он обладает свойствами гораздо более общего и не менее важного характера. Одним из наиболее замечательных из них является то, что центр тяжести любого числа отдельных тел никогда не подвергается влиянию взаимного притяжения, удара или другого влияния, которое тела могут передавать одно другому. Это необходимое следствие равенства действия и противодействия, объясненного в главе [IV](#). Для случаев A и B , [рис. 67](#), притягивают друг друга и меняются местами на A' и B' , пространство a a' будет иметь к b b' такое же отношение, какое B имеет к A , и, следовательно, согласно тому, что только что было доказано [\(171\)](#) такое же отношение, какое aC имеет к bC . Отсюда следует, что остатки $a'C$ и $b'C$ будут находиться в соотношении B к A , и что C будет продолжать оставаться центром тяжести тел после того, как они сблизятся под действием взаимного притяжения.

Предположим, например, что A и B равны 12 фунтам. и 8 фунтам. соответственно, и это ab составляло 40 футов. Точка C должна [\(171\)](#) делить ab на две части в соотношении 8 к 12 или 2 к 3. Следовательно, очевидно, что aC будет составлять 16 футов, а bC 24 фута. Теперь предположим, что A и B притягиваются друг к другу и что A приближается к B на расстояние двух футов. Тогда B должен приближаться к A на расстояние трех футов. Их расстояния от C теперь будут составлять 14 футов и 21 фут, что в соотношении B к A означает, что точка C по-прежнему будет их центром тяжести.

Отсюда следует, что если системе тел, находящейся в покое, позволить подчиняться их взаимному притяжению, то, хотя тела при этом будут перемещаться по отдельности, все же их общий центр тяжести должен оставаться неподвижным.

(175.) Когда одно из двух тел движется по прямой, а другое находится в состоянии покоя, их общий центр тяжести должен перемещаться по параллельной прямой. Пусть А и В, [рис. 69](#), будут центрами тяжести тел, и пусть А перемещается из А в а, В остается в покое. Нарисуйте линии АВ и аВ. В каждом положении, которое принимает тело В во время своего движения, центр тяжести С разделяет соединяющую их линию на части АС, ВС, которые находятся в пропорции массы В к массе А. Теперь предположим, что любое количество линий, проведенных от В до линии Аа; параллель Сс к а через С, разделяет все эти линии в одинаковой пропорции; и, следовательно, в то время как тело А движется от А к а, общий центр тяжести перемещается от С к с.

Если бы оба тела А и В двигались равномерно по прямым линиям, движение центра тяжести было бы составлено [\[74\]](#) из двух движений, которые на него повлияли бы, если бы каждое из них двигалось, в то время как другое оставалось в покое. Точно так же, если бы было три тела, каждое из которых двигалось равномерно по прямой линии, их общий центр тяжести имел бы движение, составленное из того движения, которое он имел бы, если бы одно оставалось в покое, в то время как два других двигались, и то, которое дало бы ему движение первого, если бы последние два оставались в покое; и точно так же можно доказать, что когда любое количество тел движется каждое по прямой, их общий центр тяжести будет иметь движение, составленное из движений, которые он получает от тел по отдельности.

Может случиться, что несколько движений, которые центр тяжести получает от тел системы, будут нейтрализовывать друг друга; и это действительно имеет место для таких движений, которые являются следствием взаимного действия тел друг на друга.

(176.) Если система тел не находится под непосредственным воздействием каких-либо сил и их взаимное притяжение считается приостановленным, то они должны по отдельности находиться либо в состоянии покоя, либо в равномерном прямолинейном движении в силу своей инерции. Следовательно, их общий центр тяжести также должен находиться либо в состоянии покоя, либо в равномерном прямолинейном движении. Теперь, если мы предположим, что их взаимное притяжение вступит в силу, состояние их общего центра тяжести не изменится, но тела по отдельности будут получать движения, составленные из их предыдущих равномерных прямолинейных движений и тех, которые являются результатом их взаимного притяжения. Совместное воздействие приведет к тому, что каждое тело будет вращаться по орбите вокруг общего центра тяжести или ускорит его к этой точке. Но все же эта точка сохранит свое прежнее состояние нетронутой.

Это составляет один из общих законов механики и имеет большое значение в физической астрономии. Она известна под названием “сохранение движения центра тяжести”.

(177.) Солнечная система - это пример того класса явлений, о котором мы только что говорили. Все движения тел, составляющих его, можно свести к определенным равномерным прямолинейным движениям, полученным от какого-то прежнего импульса или от силы, действие которой было приостановлено, и к тем движениям, которые с

необходимостью вытекают из принципа тяготения. Но мы не будем здесь далее настаивать на этом предмете, который более уместно отнести к другой области науки.

(178.) Если твердое тело подвергается удару в направлении линии, проходящей через его центр тяжести, все частицы тела будут двигаться вперед с одинаковой скоростью по линиям, параллельным направлению удара, и вся сила движения будет равна силе удара. Общая скорость частей тела в этом случае будет определяться принципами, изложенными в главе [IV](#). Поскольку движущая сила равномерно распределена между всеми частями, скорость будет найдена путем деления числового значения этой силы на число, выражающее массу.

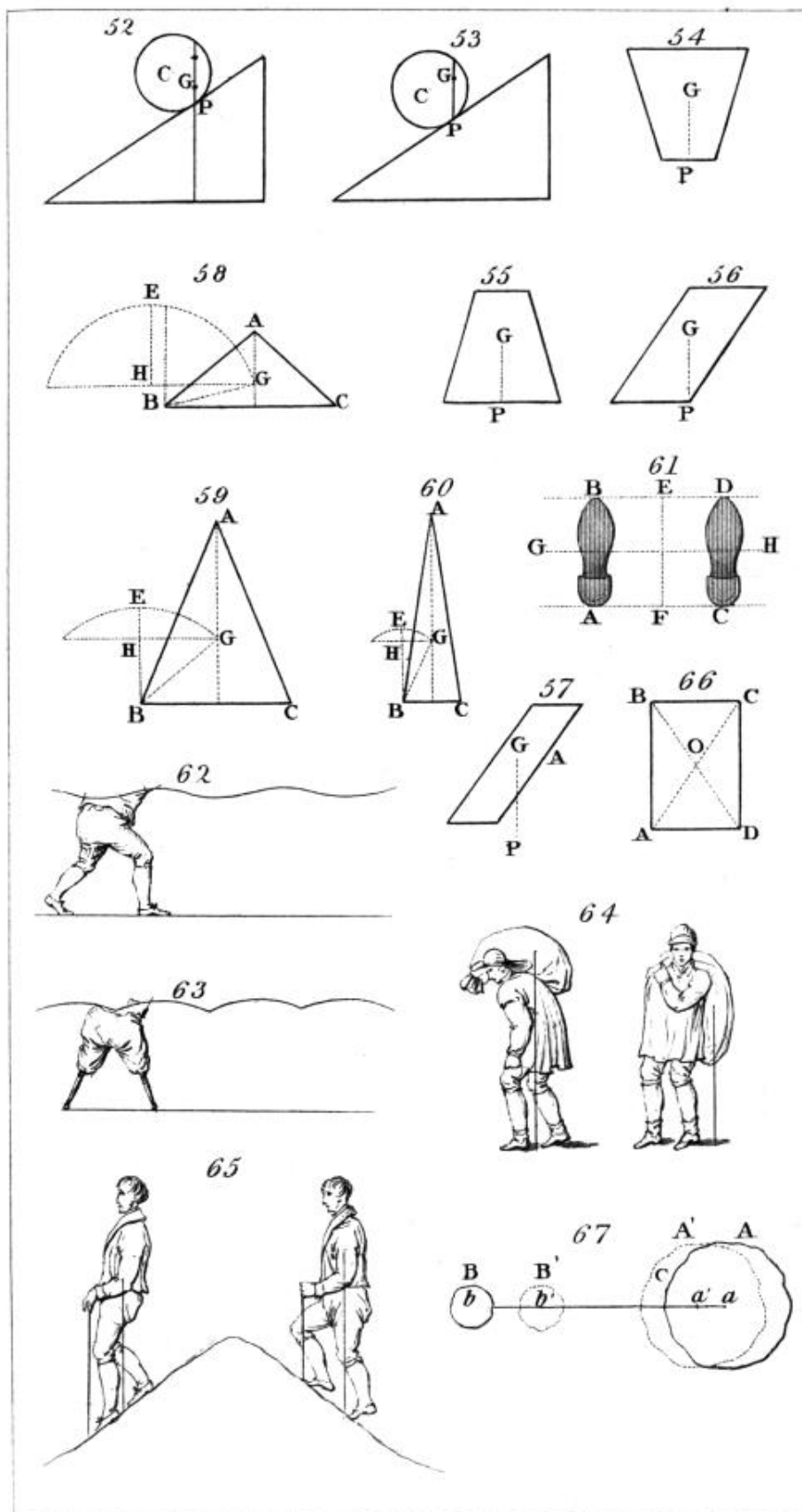
Если одновременно нанести какое-либо количество ударов по разным точкам тела, обычно возникает определенное сложное движение. Масса будет иметь относительное движение вокруг центра тяжести, как если бы она была неподвижной, в то время как эта точка будет равномерно двигаться вперед по прямой, увлекая за собой тело. Относительное движение массы вокруг центра тяжести можно определить, рассматривая центр тяжести как неподвижную точку, вокруг которой масса может свободно перемещаться, а затем определяя движение, которое произвели бы приложенные силы. Поскольку предполагается, что это движение продолжается непрерывно, пусть все силы будут приложены в их соответствующих направлениях и количествах к центру тяжести. Согласно принципам сложения сил, они будут механически эквивалентны одной силе, действующей в этой точке. В направлении действия этой единственной силы центр тяжести будет двигаться с такой же скоростью, как если бы вся масса была сосредоточена там и воспринимала движущие силы.

(179.) Эти общие свойства, которые полностью независимы от силы тяжести, делают термин "центр тяжести" неподходящим названием для обозначения этого важного момента. Следовательно, некоторые авторы, занимающиеся физикой, называли его "центром инерции". Однако "центр тяжести" - это название, которым он все еще обычно обозначается.

ГЛАВА X.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОСИ.

(180.) Когда тело совершает вращательное движение, линия, вокруг которой оно вращается, называется *осью*. Каждая точка тела в этом случае должна двигаться по окружности, центр которой лежит на оси, а радиус равен расстоянию точки от оси. Иногда, когда тело вращается, сама ось является подвижной, и нередко она находится в состоянии реального движения. Движения земли и планет или обычного вращающегося волчка являются примерами этого. Однако случаи, которые будут рассмотрены в настоящей главе, - это главным образом те, в которых ось неподвижна или, по крайней мере, где ее движение не имеет никакого отношения к исследуемым явлениям. Примеры этого настолько часты и очевидны, что вряд ли есть необходимость останавливаться на них подробнее. Колесные механизмы любого типа, движущиеся части часов, токарные станки, фрезерные станки, двери и крышки на петлях - все это очевидные примеры. В инструментах или других инструментах, которые работают с шарнирами, таких как ножницы, щипцы, несмотря на то, что шарнир или ось не зафиксированы абсолютно, это следует учитывать с точки зрения механического воздействия.



Х. Адлард, Шотландия

Лондон, издательство Longman & Co.

В некоторых случаях, как и в большинстве колес часов, маховиков и патронов токарного станка, а также рычагов ветряных мельниц, корпус постоянно вращается в одном и том же направлении, и каждая из его точек совершает полный круг при каждом обороте корпуса вокруг своей оси. В других случаях движение является поперечным или возвратно-поступательным, причем его направление через определенные промежутки времени меняется на противоположное. Так обстоит дело с маятниками часов, балансирами хронометров, педалью токарного станка, дверцами и крышками на петлях, ножницами, щипцами и т. Д. Когда чередование является постоянным и регулярным, это называется *колебанием* или *вибрацией*, как у маятников и балансиров.

(181.) Чтобы объяснить свойства оси вращения, необходимо будет рассмотреть различные виды сил, действию которых может подвергаться тело, движущееся вокруг такой оси, показать, как это действие зависит от их различных величин и направлений, отличать случаи, в которых силы нейтрализуют друг друга и взаимно уравнивают друг друга, от случаев, в которых возникает движение, определить воздействие, которому подвергается ось, и, в случаях, когда возникает движение, оценить воздействие тех центробежных сил (137.), которые создаются массой тела, вращающегося вокруг ось.

Силы в целом по продолжительности их действия подразделяются на мгновенные и продолжающиеся силы. Действие мгновенной силы достигается за бесконечно короткое время. Если тело, которое подвергается такому воздействию, было ранее неподвижным и свободным, оно будет двигаться с равномерной скоростью в направлении приложенной силы. (93.) Если, с другой стороны, тело не свободно, а сковано настолько, что импульс не может привести его в движение, то неподвижные точки или линии, которые сопротивляются движению, выдерживают соответствующий удар в момент импульса. Этот эффект, который называется *перкуссией*, как и вызывающая его сила, мгновенен.

Продолжающаяся сила производит продолжающийся эффект. Если тело свободно и до этого находилось в состоянии покоя, этот эффект заключается в постоянном увеличении скорости. Если тело сковано настолько, что приложенная сила не может привести его в движение, результатом является продолжающееся давление на точки или линии, которые его поддерживают. (94.)

Однако может случиться так, что, хотя тело и не будет абсолютно свободно двигаться, повинувшись приложенной к нему силе, все же оно может быть не настолько сковано, чтобы сопротивляться действию этой силы и оставаться в состоянии покоя. Если точка, к которой прикладывается сила, может свободно перемещаться в определенном направлении, не совпадающем с направлением приложенной силы, то эта сила будет разделена на два элемента; один из которых находится в направлении, в котором точка может свободно перемещаться, а другой - под прямым углом к этому направлению. Точка будет двигаться, подчиняясь первому элементу, а второй будет производить сотрясение или давление на точки или линии, которые удерживают тело. Фактически, в таких случаях сопротивление, оказываемое обстоятельствами, которые ограничивают движение тела, изменяет движение, которое оно получает, и поскольку каждое изменение движения должно быть следствием приложенной силы (44.), неподвижные точки или линии, которые оказывают сопротивление, должны испытывать соответствующее воздействие.

Может случиться, что силы, воздействующие на тело, будь они постоянными или мгновенными, таковы, что, будь оно свободным, оно сообщило бы ему движение, которое

сдерживающие его обстоятельства не запрещают ему принимать. В таком случае неподвижные точки или линии, которые удерживают тело, не оказывают никакого воздействия, и явления будут такими же во всех отношениях, как если бы эти точки или линии не были неподвижны.

Будет легко применить эти общие размышления к случаю, когда твердое тело может перемещаться вокруг неподвижной оси. Такое тело не подвержено никакому движению, кроме вращения вокруг этой оси. Если оно подвергается действию мгновенных сил, должен возникнуть один или другой из следующих эффектов. 1. Ось может сопротивляться силам и предотвращать любое движение. 2. Ось может изменять действие сил, поддерживая соответствующий удар, и тело получает вращательное движение. 3. Приложенные силы могут быть такими, которые заставили бы тело вращаться вокруг оси, даже если бы оно не было зафиксировано, и в этом случае тело получит вращательное движение, но ось не будет подвергаться ударам.

То, что только что было замечено относительно действия мгновенных сил, также применимо к постоянным силам. 1. Ось может полностью противостоять воздействию таких сил, и в этом случае она будет испытывать давление, которое может быть оценено по правилам распределения сил. 2. Он может изменять действие приложенных сил, и в этом случае он также должен выдерживать давление, а тело должно получать вращательное движение, которое подвержено постоянным изменениям из-за непрекращающегося действия сил. 3. Силы могут быть такими, которые сообщали бы телу такое же вращательное движение, если бы ось не была неподвижной. В этом случае силы не будут оказывать давления на ось.

Действующие силы - не единственные причины, влияющие на ось тела во время явления вращения. Этот вид движения приводит в действие другие силы, зависящие от инерции массы, которые оказывают воздействие на ось и которые играют заметную роль в теории вращения. В то время как тело вращается вокруг своей оси, составляющие его массу частицы движутся по окружностям, центры которых расположены на оси. Радиус окружности, по которой движется каждая частица, представляет собой линию, проведенную от этой частицы перпендикулярно оси. Уже было доказано, что частица материи, движущаяся вокруг центра, сопровождается центробежной силой, пропорциональной радиусу окружности, по которой она движется, и квадрату ее угловой скорости. Когда твердое тело вращается вокруг своей оси, все его части вращаются вместе, каждая совершая полный оборот за одно и то же время. Следовательно, угловая скорость одинакова для всех, и разница центробежных сил различных частиц должна полностью зависеть от их расстояния от оси. Тенденции каждой частицы отлетать от оси, возникающей под действием центробежной силы, противостоит сцепление частей массы, и в целом эта тенденция расходуется на создание давления или деформации на оси. Следует, однако, помнить, что это давление или деформация совершенно отличны от уже упомянутых и производятся силами, которые приводят в движение тело. Последнее полностью зависит от величины и направлений приложенных сил по отношению к оси: первое зависит от формы и плотности тела, а также скорости его движения.

Эти очень сложные эффекты делают простое и элементарное описание механических свойств неподвижной оси делом значительных трудностей. Действительно, полное математическое развитие этой теории долгое время ускользало от внимания самых

проницательных геометров, и только в сравнительно поздний период она поддалась тщательному анализу современной науки.

(182.) Чтобы начать с самого простого случая, мы будем рассматривать тело как находящееся под действием одной силы. Действие этой силы будет варьироваться в зависимости от отношения ее направления к направлению оси. Можно представить, что тело может перемещаться вокруг оси двумя способами. 1. За счет наличия шарниров в двух точках, которые упираются в гнезда, так что при перемещении корпуса он должен вращаться вокруг правой линии, соединяющей шарниры в качестве оси. 2. Через корпус может проходить тонкий цилиндрический стержень, на котором он может вращаться так же, как колесо на своей оси.

Если приложить силу к телу в направлении оси, очевидно, что никакого движения произойти не может, и произведенным эффектом будет давление на ту ось, к которой направлена сила. Если бы в этом случае тело вращалось на цилиндрическом стержне, то сила была бы направлена на то, чтобы заставить его скользить вдоль стержня, не вращаясь вокруг него.

Далее предположим, что усилие должно быть приложено не в направлении самой оси, а параллельно ей. Пусть AB , [рис. 70.](#) - ось, и пусть Cd - направление приложенной силы. Поскольку оси должны находиться в точках A и B , нарисуйте точки G и F перпендикулярно точке B . Сила CD будет эквивалентна трем силам, одна из которых действует от B к A и равна по величине силе CD . Очевидно, что эта сила будет оказывать соответствующее давление на ось A . Две другие силы будут действовать в направлениях Ag и Bf и будут иметь соответственно к силе Cd такое же отношение, какое Ae имеет к AB . Таким будет механическое воздействие силы Cd , параллельной оси. И поскольку все эти эффекты направлены на шарниры, никакого движения произойти не может.

Если тело вращается на цилиндрическом стержне, силы Ag и Bf будут создавать нагрузку на ось, в то время как третья сила в направлении Ba будет иметь тенденцию заставлять тело скользить вдоль нее.

(183.) Если сила, приложенная к телу, направлена вдоль оси и под прямым углом к ней, движение не может быть произведено. В этом случае, если тело поддерживается шарнирами в точках A и B , сила Kl , перпендикулярная линии Ab , будет распределяться между шарнирами, создавая давление на каждый из них пропорционально его расстоянию от другого. Давление на A имеет отношение к давлению на B в той же пропорции, что и L B к L A .

Если сила Kh направлена наклонно к оси, она будет эквивалентна двум силам ([76.](#)), одна Kl перпендикулярна оси, а другая Km параллельна ей. Эффект каждого из них может быть исследован, как и в предыдущих случаях.

Во всех этих наблюдениях предполагалось, что тело подвергается действию только одной силы. Если на него воздействуют несколько сил, направление каждой из которых пересекает ось либо перпендикулярно, либо наклонно, либо принимает направление оси или любое параллельное направление, их воздействие может быть исследовано аналогичным образом. Таким же образом мы можем определить действие любого количества сил, совокупные результаты которых механически эквивалентны силам, которые либо пересекают ось, либо параллельны ей.

(184.) Если приложить какую-либо силу, направление которой лежит в плоскости, наклонной к оси, ее всегда можно разложить на два элемента (76.), один из которых параллелен оси, а другой - в плоскости, перпендикулярной к ней. Эффект первого уже определен, и поэтому мы сейчас ограничим наше внимание вторым.

Предположим, что ось перпендикулярна бумаге и проходит через точку G, [рис. 71](#). и пусть A B C - сечение тела. Будет удобно рассматривать сечение вертикально, а ось горизонтально, не обращая, однако, внимания на влияние веса тела.

Пусть груз W подвешен на шнуре Qw из любой точки Q. Этот груз, очевидно, будет иметь тенденцию поворачивать тело в направлении Ab C. Пусть другой шнур будет прикреплен к любой другой точке P и, будучи перенесенным через колесо R, пусть к нему будет прикреплено блюдо S, и пусть в это блюдо будет насыпан мелкий песок до тех пор, пока тенденция S поворачивать тело вокруг оси в направлении Cb A не уравновесит противоположную тенденцию W. Пусть после этого будут точно установлены веса W и S, а также пусть будут точно измерены расстояния Gi и Gh шнуров от оси. Будет обнаружено, что, если количество унций в весе S умножить на количество дюймов в граммах H, а также количество унций в граммах W на количество дюймов в граммах I, будут получены равные произведения. Этот эксперимент можно разнообразить, изменяя положение колеса R и, следовательно, направление струны Pr, и в этих случаях всегда будет необходимо изменять вес S таким образом, чтобы при умножении количества унций в нем на количество дюймов на расстоянии струны от оси полученное произведение было равно произведению веса W на расстояние G I. Мы здесь использовали унции и дюймы в качестве мер веса и расстояния; но очевидно, что любые другие меры были бы одинаково применимы.

Из только что сказанного следует, что энергия веса S, необходимая для перемещения тела вокруг его оси, зависит не только от фактической величины этого веса, но также и от расстояния струны от оси. Если, в то время как положение струны остается неизменным, вес S может быть увеличен или уменьшен, сопротивляющийся вес W должен быть увеличен или уменьшен в той же пропорции. Но если, в то время как вес S остается неизменным, расстояние струны Pr от оси G увеличивается или уменьшается, окажется необходимым увеличить или уменьшить сопротивляющийся вес W в точно такой же пропорции. Следовательно, представляется, что увеличение или уменьшение расстояния направления силы от оси оказывает такое же влияние на ее способность обеспечивать вращение, как и аналогичное увеличение или уменьшение самой силы. Таким образом, мощность силы, вызывающей вращение, точно оценивается не только по силе, но и по произведению, полученному путем умножения силы на расстояние ее направления от оси. В механике часто возникает необходимость ссылаться на эту величину силы, и, соответственно, только что упомянутое изделие получило определенное обозначение. Это называется *моментом* силы, действующей вокруг оси.

(185.) Расстояние направления силы от оси иногда называют *рычагом* силы. Таким образом, *момент* силы определяется путем умножения силы на ее рычаг, и энергия данной силы для поворота тела вокруг оси пропорциональна рычагу этой силы.

Из всего, что было замечено, можно легко сделать вывод, что если на тело, движущееся вокруг оси, воздействуют несколько сил, стремящихся повернуть его в разных направлениях, они будут взаимно нейтрализовывать друг друга и приведут к равновесию, если сумма моментов тех сил, которые стремятся повернуть тело в одном направлении,

будет равна сумме моментов тех, которые стремятся повернуть его в противоположном направлении. Таким образом, если силы $A, B, C \dots$ стремятся повернуть тело справа налево, и расстояния их направлений от оси равны $a, b, c, \dots$ а силы $A', B', C' \dots$ стремятся переместить его слева направо, и расстояния их направлений от оси равны $a', b', c', \dots$ тогда эти силы приведут к равновесию, если произведения, найденные с помощью умножения унций в $A, B, C, \dots$ соответственно на дюймы в $a, b, c, \dots$ при сложении вместе будет равно произведениям, полученным путем умножения унций в $A', B', C', \dots$ на дюймы в $a', b', c', \dots$ соответственно, при сложении вместе. Но если какой-либо из этих наборов продуктов при сложении превысит другой, то возобладает соответствующий набор сил, и тело будет вращаться вокруг своей оси.

(186.) Когда тело получает импульс в направлении, перпендикулярном оси, но не пересекающем ее, создается равномерное вращательное движение. Скорость этого движения зависит от силы импульса, расстояния направления импульса от оси и способа распределения массы тела вокруг оси. Следует учитывать, что вся сила импульса распределяется между различными частями массы и передается им из точки приложения импульса по причине сцепления и прочности частей и невозможности того, чтобы одна часть поддавалась силе, не увлекая за собой все остальные части. Приложенная сила действует на те частицы, которые находятся ближе к оси, чем в ее собственном направлении, при благоприятных обстоятельствах; ибо, согласно тому, что уже было объяснено, их способность противостоять действию приложенной силы мала в той же пропорции, что и расстояние между ними. С другой стороны, приложенная сила действует на частицы массы на большем расстоянии, чем ее собственное направление, при обстоятельствах, пропорционально неблагоприятных; поскольку их сопротивление приложенной силе велико пропорционально их расстоянию от оси.

Пусть CD , [рис. 72](#). - сечение тела, образованное плоскостью, проходящей через ось AB . Предположим, что импульс должен быть приложен в точке P , перпендикулярной этой плоскости, и на расстоянии PO от оси. Эффект импульса, распределяемого по массе, заставит тело вращаться по оси B с равномерной скоростью. Существует определенная точка G , в которой, если бы вся масса была сосредоточена, она получила бы от импульса такую же скорость вращения вокруг оси. Расстояние Og называется *радиусом вращения* оси Ab , а точка G называется *центром вращения* относительно этой оси. Воздействие импульса на массу, сосредоточенную в точке G , велико ровно в той же пропорции, в какой Og мала. Это легко следует из свойства моментов, которое уже было объяснено; отсюда можно сделать вывод, что чем больше радиус вращения, тем меньше будет скорость, которую тело получит от данного импульса.

(187.) Поскольку радиус вращения зависит от способа расположения массы вокруг оси, из этого следует, что для разных осей в одном и том же теле будут разные радиусы вращения. Из всех осей, взятых в одном и том же теле параллельно друг другу, та, которая проходит через центр тяжести, имеет наименьший радиус вращения. Если задан радиус вращения любой оси, проходящей через центр тяжести, то может быть найден радиус вращения любой параллельной оси; ибо квадрат радиуса вращения любой оси равен квадрату расстояния этой оси от центра тяжести, добавленному к квадрату радиуса вращения параллельной оси, проходящей через центр тяжести.

(188.) Произведение числовых выражений для массы тела и квадрата радиуса вращения - величина, широко используемая в механике, и получила название *момента инерции*. Следовательно, моменты инерции для разных осей в одном и том же теле пропорциональны квадратам соответствующих радиусов вращения; и, следовательно, увеличиваются по мере увеличения расстояний осей от центра тяжести. (187.)

(189.) Из того, что было объяснено в (187.), следует, что момент инерции любой оси может быть вычислен обычным арифметическим методом, если предварительно известен момент инерции параллельной оси, проходящей через центр тяжести. Однако для определения этого последнего потребовались бы аналитические процессы, совершенно непригодные для природы и целей настоящего трактата.

Скорость вращения, которую тело получает от данного импульса, велика ровно в той же пропорции, в какой мал момент инерции. Таким образом, момент инерции при вращательном движении можно рассматривать аналогично массе тела при прямолинейном движении.

Из того, что было объяснено в (187.), следует, что данный импульс на данном расстоянии от оси сообщит наибольшую угловую скорость, когда ось пройдет через центр тяжести, и что скорость, которую он сообщит вокруг других осей, будет уменьшаться в той же пропорции, в какой увеличиваются квадраты их расстояний от центра тяжести, добавленные к квадрату радиуса вращения для оси, параллельной центру тяжести.

(190.) Если предположить, что на теле имеется какая-либо точка и прямые линии расходятся от этой точки во всех направлениях, то обычно существуют две из этих линий, которые, будучи взяты в качестве осей вращения, имеют больший, а другой меньший момент инерции, чем любые другие. Примечательным обстоятельством является то, что, какой бы ни была природа тела, какой бы ни была его форма и каким бы ни было предполагаемое положение точки, эти две оси наибольшего и наименьшего моментов всегда будут находиться под прямым углом друг к другу.

Эти оси и третья, проходящая через одну и ту же точку и расположенная под прямым углом к ним обеим, называются *главными осями* той точки, от которой они расходятся. Чтобы составить четкое представление об их относительном положении, пусть ось наибольшего момента будет вообразлена лежащей горизонтально с севера на юг, а ось наименьшего момента - с востока на запад; тогда третья главная ось будет представлена перпендикулярно вверх и вниз. Первые две называются главными осями наибольшего и наименьшего момента, третью можно назвать *промежуточной главной осью*.

(191.) Хотя моменты трех главных осей в общем неравны, все же можно обнаружить тела, имеющие определенные оси, для которых эти моменты могут быть равны. В некоторых случаях момент промежуточной оси равен моменту главной оси с наибольшим моментом; в других он равен моменту главной оси с наименьшим моментом, а в третьих моменты всех трех главных осей равны друг другу.

Если моменты любых двух из трех главных осей равны, моменты всех осей, проходящих через одну и ту же точку и в их плоскости, также будут равны; и если моменты трех главных

осей, проходящих через точку, равны, моменты всех осей, проходящих через одну и ту же точку, будут равны.

(192.) Если моменты главных осей, проходящих через центр тяжести, известны, то моменты для всех других осей, проходящих через эту точку, могут быть легко вычислены. Для достижения этого необходимо только умножить моменты главных осей на квадраты совпадающих синусов углов, образованных ими соответственно с осью, момент которой ищется. Продукты, добавляемые вместе, дадут необходимый момент.

(193.) Объединив этот результат с результатом ([189.](#)), станет очевидно, что момент всех любых осей может быть определен, если известны моменты главных осей, проходящих через центр тяжести.

(194.) Очевидно, что главная ось наименьшего момента, проходящая через центр тяжести, имеет меньший момент инерции, чем любая другая ось. Ибо по своему определению ([190.](#)) она имеет меньший момент инерции, чем любая другая ось, проходящая через центр тяжести, а любая другая ось, проходящая через центр тяжести, имеет меньший момент инерции, чем параллельная ось, проходящая через любую другую точку ([187.](#)) и ([189.](#))

(195.) Если две главные оси, проходящие через центр тяжести, имеют равные моменты инерции, то все оси в любой плоскости, параллельной плоскости этих осей и проходящей через точку, где перпендикуляр из центра тяжести пересекается с этой плоскостью, должны иметь равные моменты инерции. Ибо по ([191.](#)) все оси в плоскости этих двух имеют равные моменты, а по ([189.](#)) оси в параллельной плоскости имеют моменты, которые превышают их на ту же величину, будучи одинаково удаленными от них. ([187.](#))

Следовательно, очевидно, что если три главные оси, проходящие через центр тяжести, имеют равные моменты, то все оси, расположенные в любой данной плоскости и проходящие через точку, где перпендикуляр из центра тяжести пересекается с этой плоскостью, будут иметь равные моменты, будучи одинаково удаленными от параллельных осей, проходящих через центр тяжести.

(196.) Если три главные оси, проходящие через центр тяжести, имеют неодинаковые моменты, то нет вообще точки, для которой все оси имели бы равные моменты; но если главная ось с наименьшим моментом и промежуточная главная ось, проходящая через центр тяжести, имеют равные моменты, то на главной оси с наибольшим моментом будут две точки, одинаково удаленные по разные стороны от центра тяжести, в которых все оси будут иметь равные моменты. Если три главные оси, проходящие через центр тяжести, имеют равные моменты, то никакая другая точка тела не может иметь главных осей с равным моментом.

(197.) Когда тело вращается вокруг неподвижной оси, части его массы вращаются по кругу вокруг оси; и поскольку они движутся с общей угловой скоростью, на них будут действовать центробежные силы, пропорциональные их расстоянию от оси. Если бы составные части массы не были соединены вместе силами сцепления с энергиями, превышающими эти центробежные силы, они были бы разделены и отлетели бы от оси; но их сцепление препятствует этому и вызывает передачу эффектов различных центробежных сил, которые воздействуют на различные части массы, таким образом, чтобы изменять друг друга и, наконец, создавать одну или несколько сил, механически эквивалентных целому, которые

воздействуют на ось и которым она сопротивляется. Теперь мы предлагаем объяснить эти эффекты, насколько это возможно сделать понятным без помощи математического языка.

Очевидно, что любое количество равных частей массы, равномерно расположенных по кругу вокруг оси, имеют равные центробежные силы, действующие из центра круга во всех направлениях. Они взаимно нейтрализуют друг друга и, следовательно, не оказывают никакого воздействия на ось. То же самое можно сказать и обо всех частях массы, которые равномерно распределены по обе стороны от оси.

Также, если равные массы разместить на равных расстояниях по разные стороны оси, их центробежные силы уничтожат друг друга. Следовательно, оказывается, что давление, которое ось вращения выдерживает за счет центробежных сил вращающейся массы, возникает из-за неравномерного распределения вещества вокруг нее.

Из этого рассуждения легко понять, что в следующих примерах ось вращения не будет выдерживать никакого давления.

Шар, вращающийся вокруг любого из своих диаметров, плотность которого одинакова на равных расстояниях от центра.

Сфероид или цилиндр, вращающийся вокруг своей оси, причем плотность одинакова на равных расстояниях от оси.

Куб, вращающийся вокруг оси, проходящей через центр двух противоположных оснований, имеющий одинаковую плотность.

Круглая пластина одинаковой толщины и плотности, вращающаяся вокруг одного из своих диаметров в качестве оси.

(198.) Во всех этих примерах будет видно, что ось вращения проходит через центр тяжести. Общая теорема, частными примерами которой они являются, гласит: “если тело вращается вокруг главной оси, проходящей через центр тяжести, ось не будет выдерживать давления центробежной силы вращающейся массы”. Это свойство, при котором главные оси, проходящие через центр тяжести, уникальны. Нет другой оси, на которой тело могло бы вращаться без давления.

Если две главные оси, проходящие через центр тяжести, имеют равные моменты, то каждая ось в их плоскости имеет одинаковый момент и должна рассматриваться в равной степени как главная ось. В этом случае тело вращалось бы вокруг любой из этих осей без давления.

Примером этого является однородный сфероид. Если бы какой-либо из диаметров земного экватора был неподвижной осью, земля вращалась бы вокруг него, не создавая давления.

Если три главные оси, проходящие через центр тяжести, имеют равные моменты, то все оси, проходящие через центр тяжести, должны рассматриваться как главные оси. В этом случае тело вращалось бы без давления на какую-либо ось, проходящую через центр тяжести.

Примером этого является земной шар, в котором плотность массы на равных расстояниях от центра одинакова. Такое тело вращалось бы без давления по какой-либо оси, проходящей через его центр.

(199.) Поскольку в этих случаях на ось не возбуждается давление, состояние тела не изменится, если во время его вращения ось перестанет быть неподвижной. Несмотря на это, тело будет продолжать вращаться вокруг оси, и ось сохранит свое положение.

Таким образом, волчок из однородного материала симметричной формы будет устойчиво вращаться в одном и том же положении до тех пор, пока трение его острия о поверхность, на которую он опирается, не лишит его движения. Это явление может проявляться только в том случае, если ось вращения является главной осью, проходящей через центр тяжести.

(200.) Если тело вращается вокруг какой-либо оси, проходящей через центр тяжести, который не является главной осью, центробежное давление представлено двумя силами, которые равны и параллельны, но действуют в противоположных направлениях в разных точках оси. Действие этих сил заключается в создании напряжения на оси и придании телу тенденции двигаться вокруг другой оси под прямым углом к первой.

(201.) Если неподвижная ось, на которой вращается тело, является главной осью, проходящей через любую точку, отличную от центра тяжести, то центробежная сила вращающейся массы будет создавать давление, и это давление будет действовать под прямым углом к оси в точке, к которой оно является главной осью, и в плоскости, проходящей через эту ось и центр тяжести. Величина давления будет пропорциональна массе тела, расстоянию центра тяжести от оси и квадрату скорости вращения.

(202.) Поскольку все давление в этом случае воздействует на одну точку, стабильность оси не будет нарушена при условии, что только эта точка будет зафиксирована. Таким образом, даже при том, что ось должна свободно поворачиваться в этой точке, никакого движения не произойдет до тех пор, пока на тело не будут действовать внешние силы.

(203.) Если ось вращения не является главной осью, центробежные силы будут производить эффект, который не может быть представлен одной силой. Эффект можно понять, представив две силы, действующие на *разные точки* оси под прямым углом к ней и друг к другу. Величины этих давлений и их направления зависят от величины и плотности массы и положения оси способом, который невозможно объяснить без помощи математического языка и принципов.

(204.) Воздействия на ось, которые были теперь объяснены, - это те, которые возникают в результате движения вращения, по какой бы причине это движение ни возникло. Силы, производящие это движение, однако, сопровождаются воздействием на ось, которое еще предстоит заметить. Когда этим силам, независимо от того, имеют ли они природу мгновенных действий или продолжающихся сил, ось оказывает полное сопротивление, их направления должны по отдельности находиться в плоскости, проходящей через ось, или они должны, согласно принципам композиции сил [(74.) и далее.], быть механически эквивалентными силам в этой плоскости. Во всех остальных случаях приложенные силы *должны* вызывать движение и, за исключением определенных случаев, также оказывать воздействие на ось.

По правилам сложения сил можно во всех случаях разложить действующие силы на другие, которые находятся либо в плоскостях, проходящих через ось, либо в плоскостях, перпендикулярных к ней, или, наконец, одни в плоскостях, проходящих через нее, а другие в

плоскостях, перпендикулярных к ней. Действие тех, которые расположены в плоскостях, проходящих через ось, уже было объяснено; и теперь мы ограничим наше внимание теми движущими силами, которые действуют под прямым углом к оси и которые производят движение.

Будет достаточно рассмотреть действие одной силы под прямым углом к оси; ибо каким бы ни было количество сил, действующих одновременно или последовательно, эффект всего будет определяться путем объединения их отдельных воздействий. Эффект, который производит одна сила, зависит от двух обстоятельств: 1. Положения оси относительно фигуры и массы тела, и 2. Величина и направление самой силы.

В общем случае удар, который ось испытывает от удара, может быть представлен двумя ударами, нанесенными на нее в разных точках, один из которых параллелен приложенной силе, а другой перпендикулярен ей, но оба перпендикулярны оси. Однако существуют определенные обстоятельства, при которых этот эффект будет изменен.

Если импульс, который получает тело, направлен перпендикулярно плоскости, проходящей через ось и центр тяжести, и находится на расстоянии от оси, которое соответствует радиусу вращения (186.) в той же пропорции, в какой эта линия соответствует расстоянию центра тяжести от оси, то в определенных случаях импульс не вызовет соударения. Для характеристики этих случаев в целом потребовались бы аналитические формулы, которые невозможно удобно перевести на обычный язык. Однако та точка плоскости, где направление приложенной силы совпадает с ней, когда не происходит соударения с осью, называется *центром соударения*.

Если ось вращения является главной осью, центр удара должен находиться на прямой линии, проведенной через центр тяжести, пересекающей ось под прямым углом и на расстоянии от оси, о которой уже говорилось.

Если ось вращения параллельна главной оси, проходящей через центр тяжести, центр удара будет определяться таким же образом.

(205.) Ось может находиться во многих положениях, в которых не будет центра соударения; то есть не будет направления, в котором можно было бы приложить импульс, не вызвав соударения по оси. Одно из таких положений - это когда это главная ось, проходящая через центр тяжести. Это единственный случай вращения вокруг оси, в котором центробежная сила не оказывает никакого воздействия; и отсюда следует, что единственный случай, в котором ось не испытывает никакого воздействия от производимого движения, - это тот, в котором она обязательно должна испытывать воздействие от того, что производит движение.

Если на тело воздействуют постоянные силы, то их действие в каждый момент определяется общими принципами распределения сил.

ГЛАВА XI.

НА МАЯТНИКЕ.

(206.) Когда тело помещают на горизонтальную ось, которая не проходит через его центр тяжести, оно будет оставаться в постоянном равновесии только тогда, когда центр тяжести находится непосредственно под осью. Если поместить эту точку в любое другое положение, тело будет колебаться из стороны в сторону до тех пор, пока атмосферное сопротивление и трение оси не разрушат его движение. (159, 160.) Такое тело называется *маятником*. Колебательное движение, которое он получает, называется *колебанием* или *вибрацией*.

(207.) Использование маятника не только в философских целях, но и в повседневной жизни, делает его предметом значительной важности. Он предоставляет наиболее точные средства измерения времени и точного определения различных природных явлений. С его помощью обнаруживается изменение силы тяжести в различных широтах и экспериментально демонстрируется закон этого изменения. В настоящей главе мы предлагаем объяснить общие принципы, регулирующие колебания маятников. Мельчайшие подробности, касающиеся их конструкции, будут даны в двадцать первой главе этого тома.

(208.) Простой маятник состоит из тяжелой молекулы, прикрепленной к концу гибкой нити и подвешенной к неподвижной точке O , [рис. 73](#). Когда маятник помещен в положение Os , молекула находится вертикально ниже точки подвешивания, она останется в равновесии; но если ее втянуть в положение Oa и там освободить, она опустится в направлении S , двигаясь по дуге As ускоренным движением. Достигнув точки S и набрав определенную скорость, он по причине своей инерции продолжит движение в том же направлении. Следовательно, он начнет подниматься по дуге Sa' с приобретенной таким образом скоростью. Во время подъема вес молекулы замедляет ее движение точно таким же образом, каким он ускорил ее при спуске из пункта A в пункт S ; и когда молекула поднимется по дуге Sa' , равной Sa , вся ее скорость уменьшится, и она перестанет двигаться в этом направлении. Таким образом, он будет помещен в точку A' таким же образом, как в первом случае он был помещен в точку A , и, следовательно, он будет спускаться из точки A' в точку S ускоренным движением, таким же образом, как он сначала перемещался из точки A в точку S . Затем он будет подниматься от S к A , и так далее, непрерывно. В этом случае предполагается, что нить, на которой подвешена молекула, должна быть идеально гибкой, нерастяжимой и иметь незначительный вес. Предполагается, что точка подвешивания не должна иметь трения, а атмосфера не должна оказывать сопротивления движению.

Из сказанного очевидно, что времена перехода от A к A' и от A' к A равны и будут оставаться равными до тех пор, пока маятник продолжает колебаться. Если бы было зарегистрировано количество колебаний, совершаемых маятником, и известно время каждого колебания, этот прибор стал бы хронометром.

Скорость, с которой движение маятника ускоряется при его опускании к самому низкому положению, неравномерна, поскольку сила, приводящая его в движение, постоянно уменьшается и полностью исчезает в точке S . Движущая сила возникает в результате

воздействия силы тяжести на взвешенную молекулу, и этот эффект всегда возникает в вертикальном направлении AV . Чем больше угол OA , тем менее эффективной будет сила тяжести для ускорения молекулы: этот угол, очевидно, увеличивается по мере приближения молекулы к C , что видно из [рис. 73](#). В точке C сила тяжести, действующая в направлении Cb , полностью расходуется на натяжение нити и неэффективна для перемещения молекулы. Отсюда следует, что движущая сила наибольшая в точке A и постоянно уменьшается от точки A до точки C , где она полностью исчезает. Те же наблюдения будут применимы к тормозящей силе от C до A' , и к ускоряющей силе от A' до C , и так далее.

Когда указаны длина нити и интенсивность силы тяжести, время вибрации зависит от длины дуги Ac или от величины угла Aoc . Однако, если этот угол не превышает определенного предела по величине, время вибрации не будет подвержено заметным изменениям, как бы ни изменялся этот угол. Таким образом, время колебания будет одинаковым, независимо от того, равен ли угол Aoc 2° , или $1^\circ 30'$, или 1° , или любой меньшей величины. Это свойство маятника выражается словом *изохронизм*. Строгая демонстрация этого свойства зависит от математических принципов, подробности которых не подошли бы для настоящего трактата. Однако нетрудно в общих чертах объяснить, как происходит, что один и тот же маятник будет качаться по большей и меньшей дугам вибрации в одно и то же время. Если он отклоняется от точки A , сила тяжести в начале его движения приводит его в движение с эффектом, зависящим от наклона линий Oa и AV . Если он начнет свое движение с точки a , движущий эффект силы тяжести будет значительно меньше, чем в точке A ; следовательно, маятник начинает двигаться с меньшей скоростью, когда он отклоняется от точки a , чем когда он отклоняется от точки A : следовательно, большая величина колебания компенсируется увеличенной скоростью, так что большая и меньшая дуги вибрации проходят за одно и то же время.

(209.) Чтобы экспериментально установить это свойство, необходимо только подвесить небольшой металлический шарик или другое тяжелое вещество на гибкой нити и привести его в состояние вибрации, при этом вся дуга вибрации не превышает 4° или 5° . трение о точку подвешивания и другие причины постепенно уменьшат дугу вибрации, так что по прошествии нескольких часов она станет настолько малой, что движение будет едва различимо без микроскопической помощи. Если наблюдать вибрацию этого маятника относительно правильного хронометра в начале, в середине и ближе к концу его движения, то окажется, что скорость не претерпевает заметных изменений.

Этот замечательный закон изохронизма был одним из первых открытий Галилея. Говорят, что, будучи совсем маленьким, он наблюдал, как люстра, подвешенная к крыше церкви в Пизе, раскачивается маятниковым движением, и был поражен равномерностью этого колебания, даже когда степень раскачивания заметно варьировалась.

(210.) В [\(117\)](#) было указано, что притяжение действует на все тела одинаково и перемещает их с одинаковой скоростью, независимо от природы или количества материалов, из которых они состоят. Поскольку маятник движется под действием силы тяжести, следовательно, мы должны ожидать, что ни количество, ни качество маятникового тела не должны влиять на обстоятельства этого движения. И мы находим, что это действительно так; ибо если маленькие кусочки различных тяжелых веществ, таких как свинец, латунь, слоновая кость и т. Д., Подвешивать на тонких нитях одинаковой длины, они будут вибрировать в одно и то

же время, при условии, что их вес в значительной степени зависит от атмосферного сопротивления, или что они подвешены *в вакууме*.

(211.) Поскольку время колебания маятника, который совершает небольшие дуговые колебания, не зависит ни от величины дуги колебания, ни от качества или веса маятникового тела, необходимо будет объяснить обстоятельства, от которых зависит изменение этого времени.

Первым и наиболее поразительным из этих обстоятельств является длина подвесной нити. Самые грубые эксперименты покажут тот факт, что каждое увеличение длины этой нити будет производить соответствующее увеличение времени вибрации; но по какому закону происходит это увеличение? Если длину нити увеличить вдвое или втрое, увеличится ли время вибрации также в двойной или утроенной пропорции? Эта задача поддается точному математическому решению, и результат показывает, что время вибрации увеличивается не пропорционально увеличению длины нити, а как квадратный корень из этой длины; то есть, если длину нити увеличить в четырехкратной пропорции, время вибрации увеличится в двукратной пропорции. Если длину нити увеличить в девять раз, время вибрации увеличится втрое, и так далее. Это соотношение в точности такое же, как то, которое, как было доказано, существует между пространствами, через которые тело свободно падает, и временем падения. В таблице, стр. 89, если понимать, что цифры, обозначающие высоту, выражают длину различных маятников, то цифры непосредственно над ними будут выражать соответствующее время вибрации.

Этот закон соотношения длин маятников к квадратам времени колебаний может быть установлен экспериментально следующим образом:—

Пусть А, В, С, [рис. 74](#), это будут три маленьких кусочка металла, каждый из которых прикреплен нитками к двум точкам подвешивания, и пусть они будут расположены на одной вертикальной линии под точкой О; предположим, что они отрегулированы таким образом, чтобы расстояния Оа, Об и Ос были пропорциональны числам 1, 4 и 9. Пусть они будут удалены от вертикали в направлении, перпендикулярном плоскости бумаги, так что нити должны находиться в одной плоскости, и, следовательно, три маятника будут иметь одинаковый угол колебания. Теперь, когда маятник А освобожден, он немедленно ускорится на В, а В - на С, так что А завершит одно колебание раньше В или С. В конце второго колебания элемента А маятник В достигнет конца своего первого колебания, так что подвесные нити А и В будут разделены на полный угол колебания; в конце четвертого колебания элемента А подвесные нити А и В вернутся в свое первое положение, В совершив два колебания; таким образом, соотношение времен колебаний элементов В и А будет равно 2 к 1, а соотношение их длин - 4 к 1. В конце третьей вибрации А, С завершат одну вибрацию, и подвешивающие струны совпадут в положении, удаленном на целый угол вибрации от их первого положения. Таким образом, три колебания элемента А выполняются одновременно с одним колебанием элемента С: следовательно, соотношение времени колебания элементов С и А равно 3 к 1, а соотношение их длин равно 9 к 1, что соответствует уже объясненному закону.

(212.) Во всех предыдущих наблюдениях мы предполагали, что материал подвешенного тела имеет незначительную величину, и предполагалось, что весь его вес сосредоточен в физической точке. Обычно это называется простым маятником; но поскольку условия подвешивания нити без веса и тяжелой молекулы без величины не могут существовать на

практике, простой маятник следует рассматривать как воображаемый и просто использовать для установления гипотетических теорем, которые, хотя и неприменимы на практике, тем не менее являются средством исследования законов, управляющих реальными явлениями с подвешенными телами.

Поскольку маятниковое тело имеет определенную величину, несколько его частей будут расположены на разных расстояниях от оси подвеса. Если бы каждая составная часть такого тела была отдельно соединена с осью подвешивания тонкой нитью, она, будучи не связанной с другими частицами, представляла бы собой независимый простой маятник и колебалась бы в соответствии с уже объясненными законами. Отсюда следует, что те частицы тела, которые находятся ближе всего к оси подвешивания, если бы они были освобождены от своей связи с другими, вибрировали бы быстрее, чем те, которые находятся дальше. Однако связь, которую имеют частицы тела в силу их плотности, заставляет их все вибрировать в одно и то же время. Следовательно, те частицы, которые находятся ближе к оси, задерживаются из-за более медленного движения тех, которые находятся дальше; в то время как более удаленные частицы, с другой стороны, продвигаются вперед из-за большей склонности более близких частиц к быстрой вибрации. Это будет легче понять, если мы представим себе две частицы материи А и В, [рис. 75](#), который должен быть соединен с той же осью О негибкой проволокой Ос, весом которой можно пренебречь. Если бы В был удален, А вибрировал бы в течение определенного времени в зависимости от расстояния ОА. Если бы А сняли и В поместили на проволоку на расстоянии Во, равном четырехкратному Ао, В вибрировал бы в два раза быстрее, чем раньше. Теперь, если оба они будут размещены на проволоке на только что упомянутых расстояниях, тенденция А вибрировать быстрее будет передана В посредством проволоки и будет подталкивать В вперед быстрее, чем если бы А отсутствовал: с другой стороны, тенденция В вибрировать медленнее будет передана проволокой на А и заставит его двигаться медленнее, чем если бы В отсутствовал. Негибкость соединительного провода в этом случае заставит А и В вибрировать одновременно, причем время вибрации будет больше, чем у А, и меньше, чем у В, если каждый вибрирует без связи с другим.

Если бы вместо предположения о двух частицах вещества, помещенных на проволоку, предполагалось, что большее их количество должно быть размещено на различных расстояниях от О, очевидно, было бы применимо то же рассуждение. Они будут взаимно влиять на движение друг друга; те, что расположены ближе всего к точке О, ускоряют движение тех, что более удалены, и сами замедляются последними. Среди этих частиц была бы найдена такая, в которой все эти эффекты были бы взаимно нейтрализованы, причем все частицы, находящиеся ближе к О, были бы замедлены по отношению к тому движению, которое они имели бы, если бы не были связаны с остальными, а более удаленные были бы в том же отношении ускорены. Точка, в которой находится такая частица, называется *центром колебаний*.

То, что было здесь замечено относительно воздействия частиц вещества, помещенных на жесткую проволоку, будет в равной степени применимо к частицам твердого тела. Те, что находятся ближе к оси, продвигаются вперед теми, что находятся дальше, и, в свою очередь, задерживаются ими; и, как и в случае с частицами, помещенными на проволоку, в теле есть определенная частица, воздействие на которую взаимно нейтрализуется и которая вибрирует в то же время, как если бы она не была связана с другими частями тела, а просто

была соединена тонкой нитью с осью. Благодаря этому центру колебаний расчеты, касающиеся вибрации твердого тела, становятся такими же простыми, как расчеты вибрации молекулы незначительной величины. Таким образом, все свойства, которые были объяснены как присущие простому маятнику, могут быть перенесены на вибрирующее тело любой величины и формы, если рассматривать его как эквивалент отдельной частицы материи, вибрирующей в центре своих колебаний.

(213.) Из этого рассуждения следует, что виртуальную длину маятника следует оценивать по расстоянию его центра колебаний от оси подвеса, и, следовательно, что времена колебаний различных маятников находятся в той же пропорции, что и квадратные корни из расстояний их центров колебаний от их осей.

Определение положения центра колебаний в большинстве случаев является предметом сложных математических расчетов. Это зависит от величины и формы маятникового тела, способа распределения массы по его объему или плотности нескольких его частей, а также от положения оси, на которой оно качается.

Местоположение центра колебаний может быть определено, когда известно положение центра тяжести и центра вращения; поскольку расстояние центра колебаний от оси всегда будет получено путем деления квадрата радиуса вращения ([186.](#)) на расстояние центра тяжести от оси. Таким образом, если 6 - радиус вращения, а 9 - расстояние силы тяжести от оси, то 36, деленное на 9, что равно 4, будет расстоянием центра колебаний от оси. Отсюда можно сделать общий вывод, что чем больше отношение радиуса вращения к расстоянию центра тяжести от оси, тем больше будет расстояние от центра колебаний.

Из этого рассуждения следует, что длина маятника не ограничена размерами его объема. Если ось расположена таким образом, что центр тяжести находится вблизи нее, а центр вращения сравнительно удален от нее, центр колебаний может быть вынесен далеко за пределы подвешенного тела. Предположим, что центр тяжести находится на расстоянии одного дюйма от оси, а центр вращения - 12 дюймов, тогда центр колебаний будет находиться на расстоянии 144 дюймов, или 12 футов. Такой маятник в своих наибольших размерах не может превышать одного фута, и все же время его колебаний было бы равно времени колебания простого маятника длиной 12 футов.

С помощью этих средств можно заставить маятники небольших размеров вибрировать настолько медленно, насколько это может быть желательно. Инструменты, называемые *метрономами*, используемые для отсчета времени музыкальных выступлений, построены по этому принципу.

(214.) Центр колебаний отличается весьма примечательным свойством по отношению к оси подвеса. Если А, то [рис. 76.](#), будь то точка подвешивания и соответствующий центр колебаний, время колебания маятника не изменится, если его поднять с опоры, перевернуть и подвесить в точке О. Отсюда следует, что если О принять за точку подвешивания, то А будет соответствующим центром колебаний. Следовательно, эти две точки являются взаимозаменяемыми. Это свойство может быть проверено экспериментально следующим образом. Когда маятник приводится в состояние вибрации, пусть небольшое тяжелое тело будет подвешено на тонкой нити, длина которой отрегулирована таким образом, чтобы она вибрировала одновременно с маятником. Измерим расстояние от точки подвешивания до центра колеблющегося тела и перенесем это расстояние на маятник от оси подвешивания

вниз; таким образом, будет получено местоположение центра колебаний, поскольку расстояние, измеренное таким образом от оси, равно длине эквивалентного простого маятника. Если теперь поднять маятник со своей опоры, перевернуть и подвесить к полученному таким образом центру колебаний, то окажется, что он вибрирует одновременно с телом, подвешенным на нити.

(215.) Это свойство взаимозаменяемости центров колебаний и подвеса было в более поздний период использовано капитаном Кейтером в качестве точного средства определения длины маятника. После определения с большой точностью двух точек подвешивания, в которых одно и то же тело будет вибрировать в одно и то же время, при точном измерении расстояния между этими точками будет получена длина эквивалентного простого маятника. См. Главу [XXI](#).

(216.) Поскольку мы объяснили, каким образом время колебания маятника зависит от его длины, то теперь рассмотрим, как на это время влияет притяжение силы тяжести. Очевидно, что, поскольку маятник приводится в движение этим притяжением, скорость его движения будет увеличена, если побудительная сила получит какое-либо увеличение; но еще предстоит решить, в какой именно пропорции время колебаний будет уменьшено при любом предполагаемом увеличении интенсивности земного притяжения. Математически можно продемонстрировать, что время одного колебания маятника имеет такое же отношение ко времени свободного падения в перпендикулярном направлении на высоту, равную половине длины маятника, как длина окружности к ее диаметру. Следовательно, поскольку времена колебаний маятников находятся в постоянной пропорции ко времени свободного падения через промежутки, равные половине их длины, из этого следует, что это время имеет такое же отношение к силе притяжения, какое время свободного падения через их длины имеет к этой силе. Если бы интенсивность силы тяжести была увеличена в четырехкратной пропорции, время падения с данной высоты сократилось бы в двукратной пропорции; если бы интенсивность была увеличена в девятикратной пропорции, время падения через данное пространство сократилось бы в трехкратной пропорции и так далее; скорость уменьшения времени всегда равна квадратному корню из увеличенной силы. В соответствии с тем, что только что было изложено, этот закон также применим к вибрации маятников. Любое увеличение интенсивности силы тяжести заставило бы данный маятник вибрировать быстрее, и увеличенная скорость вибрации была бы в той же пропорции, что и квадратный корень из увеличенной интенсивности силы тяжести.

(217.) Поскольку законы, регулирующие время колебания маятников относительно друг друга, хорошо поняты, вся теория этих инструментов будет завершена, когда будет объяснен метод определения фактического времени колебания любого маятника в зависимости от его длины. При таком исследовании необходимо определить два элемента: 1. точное время одиночной вибрации и 2. точное расстояние от центра колебаний до точки подвешивания.

Первое устанавливается путем приведения в движение маятника при наличии хорошего хронометра и точного наблюдения за количеством колебаний, совершаемых за любое предполагаемое количество часов. Все время, в течение которого качается маятник, будучи разделенным на количество колебаний, совершенных за это время, будет получено точное время одного колебания.

Расстояние от центра колебаний до точки подвешивания можно легко рассчитать, придав маятниковому корпусу определенную однородную форму и материал.

(218.) Получив таким образом время колебания одного маятника известной длины, мы сможем немедленно решить любую из следующих задач.

“Чтобы найти длину маятника, который будет колебаться за заданное время”.

“Чтобы найти время колебания маятника заданной длины”.

Первая задача решается следующим образом: время вибрации известного маятника соответствует времени вибрации требуемого маятника, поскольку квадратный корень из длины известного маятника равен квадратному корню из длины требуемого маятника. Таким образом, эта длина определяется обычными правилами арифметики.

Последняя задача может быть решена следующим образом: длина известного маятника равна длине предлагаемого маятника, поскольку квадрат времени вибрации известного маятника равен квадрату времени вибрации предлагаемого маятника. Следовательно, последнее время может быть найдено с помощью арифметики.

(219.) Поскольку скорость вращения маятника имеет известную зависимость от интенсивности земного притяжения, этот прибор позволяет нам не только обнаруживать определенные изменения этого притяжения в различных частях земли, но и определять фактическую величину притяжения в любом данном месте.

Фактическая величина земного притяжения в любом данном месте оценивается высотой, на которую тело могло бы свободно упасть в этом месте в любой данный момент времени, например, за одну секунду. Чтобы определить это, пусть будет найдена длина маятника, который колебался бы в этом месте за одну секунду. Как длина окружности равна ее диаметру² (известная пропорция), так и одна секунда будет равна времени падения с высоты, равной половине длины этого маятника. Таким образом, это время является вопросом арифметического расчета. В (120) было доказано, что высоты, с которых тело свободно падает, находятся в той же пропорции, что и квадраты времен; отсюда следует, что квадрат времени падения с высоты, равной половине длины маятника, равен одной секунде, поскольку половина длины этого маятника равна высоте, с которой тело упало бы за одну секунду. Следовательно, эта высота может быть немедленно вычислена, и таким образом может быть установлена фактическая величина силы тяжести в любом данном месте.

(220.) Чтобы сравнить силу тяжести в разных частях земли, необходимо только раскатать один и тот же маятник в рассматриваемых местах и понаблюдать за быстротой его колебаний. Пропорция силы тяжести в нескольких местах будет равна квадрату скорости вибрации. Наблюдения на этот счет были сделаны в нескольких местах Биотом, Катером, Сабиной и другими.

Поскольку земля представляет собой массу вещества почти сферической формы, вращающуюся со значительной скоростью вокруг оси, на ее составные части действует центробежная сила; в силу чего они имеют тенденцию разлетаться в направлении, перпендикулярном оси. Эта тенденция возрастает в той же пропорции, в какой увеличивается расстояние какой-либо части от оси, и, следовательно, те части земли, которые находятся вблизи экватора, более сильно подвержены этому влиянию, чем те, которые находятся вблизи полюса. Уже было объяснено (145.), что эта причина повлияла на

форму земли и что она приобрела сфероидальную форму. Центробежная сила, действующая в противовес земному притяжению, уменьшает его действие; и, следовательно, там, где эта сила более эффективна, маятник будет колебаться медленнее. С помощью этих средств скорость вибрации маятника становится показателем величины центробежной силы. Но это последнее изменяется пропорционально расстоянию места от земной оси; и, таким образом, скорость маятника указывает на соотношение расстояний различных частей земной поверхности от ее оси. Таким образом, можно установить форму земли, и то, что ей приписывает теория, может быть практически доказано.

Это, однако, не единственный метод, с помощью которого можно определить форму земли. Поскольку меридианы являются сечениями земли через ее ось, то, если бы их фигура была точно определена, была бы известна фигура земли. Измерения дуг меридианов в крупном масштабе проводились и до сих пор проводятся в различных частях земли с целью определения кривизны меридиана на разных широтах. Этот метод независим от любых гипотез, касающихся плотности и внутренней структуры земли, и, по мнению некоторых, обеспечивает большую точность, чем тот, который зависит от наблюдений за маятниками.

(221.) Было указано, что, когда дуга колебания маятника не очень мала, изменение его длины будет оказывать ощутимое влияние на время вибрации. Сконструировать маятник таким образом, чтобы время вибрации не зависело от величины колебания, было излюбленной идеей геометров. Эта проблема была решена Гюйгенсом, который показал, что кривая, называемая *циклоидой*, ранее открытая и описанная Галилеем, обладает свойством изохронности; то есть тело, движущееся по ней под действием силы тяжести, будет вибрировать в одно и то же время, какой бы ни была длина описываемой дуги.

Пусть OA , [рис. 77](#) - горизонтальная линия, и пусть Ob - окружность, расположенная под этой линией и соприкасающаяся с ней. Если этот круг перекатить по линии от O к A , точка на его окружности, которая в начале движения расположена в точке O , во время движения будет описывать кривую OsA . Эта кривая называется *циклоидой*. Если предположить, что окружность вращается в противоположном направлении по направлению к A' , то та же точка будет проследивать другую циклоиду $Os'A'$. Точки S и S' являются низшими точками кривых, и если провести перпендикуляры CD и $C'D'$, то они будут соответственно равны диаметру окружности. Согласно известному свойству этой кривой, дуги Os и Os' равны удвоенному диаметру окружности. Предположим, что из точки O подвешена гибкая нить, длина которой в два раза больше диаметра окружности и которая поддерживает на своем конце подвешенное тело P . Если кривые Os и Os' приподнять от плоскости бумаги так, чтобы образовать поверхности, к которым может быть приложена нить, то крайность P будет простираться до точек S и S' , когда вся нить будет приложена к любой из кривых. Поскольку нить отклоняется по обе стороны от своего вертикального положения, она наносится на большую или меньшую часть любого изгиба в зависимости от величины ее отклонения от вертикали. Если его отклонять с каждой стороны до тех пор, пока точка P не достигнет точек S и S' , то оконечность будет описывать циклоиду SrS' , точно равную и подобную уже упомянутым. Воспользовавшись этим свойством кривой, Гюйгенс сконструировал свой циклоидальный маятник. Время вибрации не подлежало никаким изменениям, однако дуга вибрации могла измениться, при условии только, что длина струны Op оставалась прежней. Если взять небольшие дуги циклоиды по обе стороны от точки P , они не будут заметно отличаться от дуг окружности, описанной центром O и

радиусом $O\rho$; поскольку при незначительных отклонениях от вертикального положения влияние кривых Oc и Oc' на нить $O\rho$ совершенно незначительно. Именно по этой причине, когда дуги колебаний кругового маятника малы, они обладают свойством изохронизма, свойственным дугам циклоиды. Но когда отклонение P от вертикали велико, воздействие кривых Oc и Oc' на нить приводит к значительному отклонению точки P от дуги окружности, центр которой равен O , а радиус - $O\rho$, и, следовательно, свойство изохронности больше не будет наблюдаться в круговом маятнике.

ГЛАВА XII. О ПРОСТЫХ МАШИНАХ.

(222.) МАШИНА - это инструмент, с помощью которого сила или движение могут передаваться и изменяться в зависимости от их количества и направления. Существует два способа применения машины, которые приводят к разделению науки о механике на части, обозначаемые как СТАТИКА и ДИНАМИКА; одна включает теорию равновесия, а другая - теорию движения. Когда машина рассматривается статически, она рассматривается как инструмент, с помощью которого воздействуют силы определенных величин и направления, чтобы уравновесить другие силы других величин и других направлений. Если рассматривать его динамически, то он рассматривается как средство, с помощью которого могут быть совершены определенные движения определенного количества и направления для создания других движений в других направлениях и количествах. Однако в настоящем трактате будет неудобно следовать такому разделению предмета. С другой стороны, мы будем, как и до сих пор, рассматривать явления равновесия и движения вместе.

Эффекты машин слишком часто описываются таким образом, чтобы придать им видимость парадокса и вызвать удивление по поводу того, что кажется противоречащим результатам самого обычного опыта. Нашей целью здесь будет пойти другим путем и попытаться показать, что те эффекты, которые считались предметом удивления, являются необходимыми, естественными и очевидными результатами причин, приспособленных для их возникновения способом, аналогичным объектам наиболее знакомого опыта.

(223.) При использовании машины необходимо учитывать три момента. 1. Силу или сопротивление, которое требуется поддерживать, противодействовать или преодолевать. 2. Сила, которая используется для поддержания или преодоления этого сопротивления. 3. Сама машина, с помощью которой действие этой последней силы передается на первую. Какой бы природы ни была сила или сопротивление, которые необходимо поддерживать или преодолевать, технически это называется *весом*, поскольку, каким бы он ни был, всегда можно найти вес эквивалентного действия. Сила, которая используется для поддержания или преодоления этого, технически называется *мощью*.

(224.) Выражая действие механизмов, обычно говорят, что мощность поддерживает вес; но на самом деле это не так, и отсюда возникает та видимость парадокса, на которую уже ссылались. Если, например, говорится, что сила в одну унцию выдерживает вес в одну тонну, удивление не является чем-то неестественным, потому что факт, изложенный таким образом, если понимать термины буквально, физически невозможен. Никакая мощность меньше тонны не может, в обычном понимании этого слова, выдержать вес в тонну. Однако возникнет вопрос, как случилось, что *появилась* машина для этого? как это получается, что, удерживая шелковую нить, которая могла бы порваться при весе в унцию, можно выдержать вес во много сотен фунтов? Чтобы объяснить это, необходимо будет только рассмотреть действие машины, когда мощность и вес находятся в равновесии.

(225.) В каждой машине есть несколько неподвижных точек или подпорок; и расположение частей всегда таково, что давление, создаваемое мощностью, или весом, или и тем и другим,

распределяется между этими подпорками. Если вес достигает двухсот килограммов, его можно распределить таким образом, чтобы любая его часть, какой бы большой она ни была, могла быть брошена на неподвижные точки или опоры машины; правильно можно сказать, что только оставшаяся часть поддерживается силой, и эта часть никогда не может быть больше силы. Рассматривая эффект таким образом, получается, что мощность поддерживает ровно столько веса, и не больше, сколько равно ее собственной силе, и что вся остальная часть веса приходится на машину. Сила этих наблюдений станет более очевидной, когда будут объяснены природа и свойства механических механизмов и других машин.

(226.) Когда машина рассматривается динамически, ее эффекты объясняются на основе различных принципов. Верно, что в этом случае очень малая мощность может поднять очень большой вес; но, тем не менее, при этом, какая бы машина ни использовалась, общая затрата энергии на подъем груза на любую высоту никогда не будет меньше той, которая была бы затрачена, если бы мощность была немедленно приложена к весу без вмешательства какой-либо машины. Это обстоятельство вытекает из универсального свойства машин, благодаря которому скорость движения груза всегда меньше скорости движения мощности, точно в той же пропорции, в какой сама мощность меньше веса; так что, когда для подъема груза применяется определенная мощность, скорость, с которой осуществляется подъем, всегда медленная, в той же пропорции, в какой вес велик. При должном рассмотрении этого замечательного закона легко понять, что машина никогда не сможет уменьшить общую затрату энергии, необходимую для поднятия какого-либо веса или преодоления какого-либо сопротивления. В таких случаях все, что машина когда-либо делает или вообще может сделать, - это позволить энергии расходоваться медленно и в более выгодном направлении, чем если бы она немедленно прилагалась к весу или сопротивлению.

Предположим, что P - это мощность, равная унции, а W - вес, равный 50 унциям, и что P поднимает W с помощью машины. В силу уже указанного свойства из этого следует, что при перемещении P на 50 футов W будет перемещено на 1 фут; но при перемещении P на 50 футов прилагается 50 различных усилий, каждым из которых 1 унция перемещается на 1 фут и с помощью которых в совокупности 50 различных унций могут быть последовательно подняты на 1 фут. Но вес W составляет 50 унций и был поднят на 1 фут; отсюда следует, что затрата энергии равна той, которая была бы необходима для подъема груза без вмешательства какой-либо машины.

Этот важный принцип может быть представлен в другом аспекте, который, возможно, сделает его более очевидным. Предположим, что вес W был фактически разделен на 50 равных частей, или предположим, что это был сосуд с жидкостью, весящий 50 унций и содержащий 50 равных мер; если бы эти 50 мер были последовательно подняты на высоту 1 фут; усилия, необходимые для достижения этого, были бы такими же, как те, которые использовались для перемещения устройства P на расстояние 50 футов, и очевидно, что общая затрата силы была бы такой же, какая потребовалась бы для подъема всего содержимого сосуда на высоту 1 фут.

Когда природа и свойства механических механизмов будут объяснены, сила этих наблюдений будет воспринята более отчетливо. Тогда проявится влияние подпорок и неподвижных точек на поддержание части веса, а иногда и всего, как веса, так и мощности, и каждая машина предоставит подтверждение замечательной пропорции между скоростями

веса и мощности, которая позволила нам объяснить то, что в противном случае могло бы показаться парадоксальным и трудным для понимания.

(227.) Наиболее простыми видами машин являются те, которые обычно обозначаются как МЕХАНИЧЕСКИЕ СИЛЫ. Разные авторы по-разному перечисляли их. Если, однако, цель состоит в том, чтобы распределить по различным классам и в возможно меньшем их количестве те машины, которые в принципе одинаковы, механические мощности могут быть сокращены до трех.

- | | | |
|----|-----------|------------|
| 1. | | Рычаг. |
| 2. | | Шнур. |
| 3. | Наклонная | плоскость. |

К тому или иному из этих классов могут быть сведены все простые машины, какие бы они ни были, и все сложные машины могут быть разложены на простые элементы, которые им подчиняются.

(228.) К первому классу относятся все машины, состоящие из твердого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси, хотя название "рычаг" обычно используется в тех случаях, когда машина воздействует на определенные формы. Это, безусловно, самый полезный класс машин, и в последующих главах он потребует очень детальной разработки. Общий принцип, на основе которого устанавливается равновесие между мощностью и весом в машинах этого класса, уже объяснялся в (183.) Предполагается, что мощность и вес всегда должны прилагаться в направлениях, перпендикулярных оси. Если провести линии от оси, перпендикулярной направлениям мощности и веса, равновесие сохранится при условии, что мощность, умноженная на перпендикулярное расстояние ее направления от оси, будет равна весу, умноженному на перпендикулярное расстояние ее направления от оси. Это принцип, на который у нас будет возможность сослаться при объяснении различных машин этого класса.

(229.) Если момент силы (184.) будет больше, чем момент веса, эффект силы будет преобладать над эффектом веса и поднимет его; но если, с другой стороны, момент силы будет меньше, чем момент веса, мощности будет недостаточно, чтобы поддержать вес, и позволит ему упасть.

(230.) Ко второму классу простых машин относятся все те случаи, в которых усилие передается с помощью гибких нитей, канатов или цепей. Принцип, по которому оценивается эффективность работы этих машин, заключается в том, что натяжение по всей длине одного и того же шнура, при условии, что он идеально гибкий и не подвержен воздействию трения, должно быть одинаковым. Таким образом, если сила, действующая на одном конце, уравновешивается силой, действующей на другом конце, то, как бы ни был согнут шнур или какой бы курс он ни был вынужден избрать, по любым причинам, которые могут воздействовать на него между его концами, эти силы должны быть равны, при условии, что шнур может свободно перемещаться по любым препятствиям, которые могут его отклонить.

В этот класс машин входят все различные формы *шкивов*.

(231.) Третий класс простых машин включает все те случаи, когда вес или сопротивление поддерживается или перемещается по твердой поверхности, наклоненной в вертикальном направлении.

Эффективность работы таких машин оценивается путем деления всего веса тела на два элемента с помощью параллелограмма сил. Один из этих элементов перпендикулярен поверхности и поддерживается за счет ее сопротивления; другой параллелен поверхности и поддерживается за счет мощности. Следовательно, отношение мощности к весу всегда будет зависеть от наклона поверхности к направлению движения груза. Это будет легко понять, обратившись к тому, что уже было объяснено в главе VIII.

К этому классу машин относятся наклонные плоскости, обычно так называемые, клин, винт и различные другие.

(232.) Чтобы упростить разработку элементарной теории машин, целесообразно опустить рассмотрение многих обстоятельств, которые, однако, должны быть строго учтены, прежде чем можно будет попытаться применить эту теорию к чему-либо практически полезному. Машина, как мы должны сейчас ее рассматривать, - это вещь, которая не может иметь реального или практического существования. Считается, что различные ее части не подвержены трению: предполагается, что все соприкасающиеся поверхности должны быть бесконечно гладкими и отполированными. Твердые детали задуманы как абсолютно негибкие. Весом и инерцией самой машины полностью пренебрегают, и мы рассуждаем о ней так, как если бы она была лишена этих качеств. Предполагается, что шнуры и веревки не должны обладать жесткостью, быть бесконечно гибкими. Предполагается, что машина, когда она движется, не должна испытывать сопротивления атмосферы и во всех отношениях находиться в таких условиях, как если бы она находилась в вакууме.

Едва ли необходимо утверждать, что, поскольку все эти предположения ложны, ни одно из следствий, выводимых из них, не может быть истинным. Тем не менее, поскольку задача искусства - максимально приблизить машины к этому состоянию идеального совершенства, полученные таким образом выводы, хотя и ложны в строгом смысле, все же лишь в небольшой степени отклоняются от истины. Подобно первому наброску картины, они в своих общих чертах напоминают ту истину, к которой после многих последующих исправлений они должны, наконец, приблизиться.

После того, как было сделано первое приближение на основе нескольких упомянутых ложных предположений, последовательно принимаются во внимание различные эффекты, которыми ранее пренебрегали. Шероховатость, жесткость, недостаточная гибкость, сопротивление воздуха и других жидкостей, влияние веса и инерции машины рассматриваются по отдельности и выявляются их закономерности и свойства. Модификации и исправления, предложенные таким образом как необходимые для внесения в наши предыдущие выводы, применяются, и делается второе приближение, но все же *только* приближение к истине. Ибо, исследуя законы, регулирующие несколько только что упомянутых эффектов, мы вынуждены исходить из новой группы ложных предположений. Чтобы определить законы, регулирующие трение поверхностей, необходимо предположить, что каждая часть соприкасающихся поверхностей равномерно шероховата; что твердые части, которые являются недостаточно жесткими, и шнуры, которые являются недостаточно гибкими, состоят по всем своим размерам из однородного материала; так что несовершенство одной части не преобладает больше, чем другой. Таким образом, все

нерегулярности не принимаются во внимание, и берется общее среднее значение результатов. Следовательно, очевидно, что с помощью этих средств нам все еще не удалось добиться результата, в точности соответствующего реальному положению вещей; но столь же очевидно, что мы получили результат, гораздо более соответствующий этому состоянию, чем было достигнуто ранее, и достаточно близкий к нему для большинства практических целей.

Это очевидное несовершенство наших инструментов и возможностей исследования присуще не только механике: оно присуще всем разделам естествознания. В астрономии движения небесных тел и их различные изменения и проявления, разработанные теорией с помощью наблюдений и опыта, являются лишь приближениями к реальным движениям и проявлениям, которые имеют место в природе. Верно, что эти приближения допускают почти неограниченную точность; но все же они являются и всегда будут оставаться всего лишь приближениями. Оптика и все другие отрасли естествознания подвержены тем же наблюдениям.

ГЛАВА XIII.

РЫЧАГА.

(233.) Ан Негибкий прямой стержень, вращающийся вокруг оси, обычно называют *рычагом*. *Плечи* рычага - это те части стержня, которые проходят по обе стороны от оси.

Ось называется *точкой опоры* или *опорой*.

(234.) Рычаги обычно делятся на три типа в зависимости от взаимного расположения силы, веса и точки опоры.

В рычаге первого типа, как показано на [фиг. 78](#), точка опоры находится между силой и весом.

В рычаге второго типа, как показано на [фиг. 79](#), вес находится между точкой опоры и силой.

В рычаге третьего типа, как показано на [фиг. 80](#), сила находится между точкой опоры и весом.

(235.) Во всех этих случаях сила будет поддерживать вес в равновесии при условии, что его момент равен моменту веса. ([184](#).) Но момент мощности в этом случае равен произведению, полученному путем умножения мощности на ее расстояние от точки опоры; и момент веса путем умножения веса на его расстояние от точки опоры. Таким образом, если количество унций в P , умноженное на количество дюймов в Pf , будет равно количеству унций в W , умноженному на количество дюймов в Wf , установится равновесие. Из этого очевидно, что по мере увеличения расстояния мощности от точки опоры по сравнению с расстоянием веса от точки опоры, в точно такой же степени будет уменьшаться отношение мощности к весу. Другими словами, отношение мощности к весу всегда будет таким же, как и отношение расстояний от точки опоры, взятых в обратном порядке.

В случаях, когда требуется небольшая мощность для поддержания или подъема большого веса, следовательно, необходимо либо убрать мощность на большое расстояние от точки опоры, либо поднести вес очень близко к ней.

(236.) Можно привести многочисленные примеры рычагов первого рода. Примером может служить перекладина, применяемая для подъема камня или другого груза. Точка опоры - это другой камень, помещенный рядом с тем, который нужно поднять, а сила - это рука, помещенная на другой конец перекладины.

Похожий пример - шпатель для рук.

Кочерга, применяемая для подъема топлива, представляет собой рычаг первого типа, точкой опоры которого является перекладина решетки.

Ножницы, щипцы, клещевина и другие подобные инструменты состоят из двух рычагов первого типа; точкой опоры является шарнир, а весом - сопротивление материала, который нужно разрезать или захватить; силой являются пальцы, нажимаемые на другой конец рычагов.

Тормоз насоса - это рычаг первого рода; штоки насоса и поршень представляют собой поднимаемый вес.

(237.) Примеры рычагов второго рода, хотя и не столь частые, как только что упомянутые, не являются редкостью.

Весло - это рычаг второго рода. Реакция воды на лопасть является точкой опоры. Лодка - это вес, а рука лодочника - сила.

Руль корабля или шлюпки является примером такого рычага и объясняется аналогичным образом.

Нож для рубки - это рычаг второго рода. Конец, прикрепленный к скамейке, является точкой опоры, а вес - сопротивлением материала, который нужно разрезать, помещенного под нее.

Еще один пример - дверь, сдвинутая с петель.

Орехокол - это два рычага второго рода; шарнир, который их объединяет, является точкой опоры, сопротивление скорлупы, помещенной между ними, является весом, а рука, приложенная к конечности, является силой.

Тачка - это рычаг второго рода; точка опоры - это точка, в которой колесо прижимается к земле, а вес - это вес тачки и ее груза, собранных в их центре тяжести.

То же замечание можно применить ко всем двухколесным повозкам, которые частично поддерживаются животным, их запрягающим.

(238.) В рычаге третьего типа вес, находящийся на большем расстоянии от точки опоры, чем сила, должен быть пропорционально меньше ее. Таким образом, в этом приборе мощность воздействует на груз с механическим недостатком, поскольку для поддержания или перемещения груза необходима большая мощность, чем потребовалось бы, если бы мощность была немедленно приложена к грузу без вмешательства машины. Однако в дальнейшем мы покажем, что преимущество, которое теряется в силе, приобретает в быстроте, и что пропорционально тому, насколько вес меньше силы, приводящей его в движение, настолько и скорость его движения будет больше, чем скорость этой силы.

Следовательно, рычаг третьего рода используется только в тех случаях, когда применение большой мощности является соображением второстепенным по сравнению с соображениями быстроты и оперативности.

Наиболее яркий пример рычагов третьего рода можно найти в животноводстве. Конечности животных обычно являются рычагами такого типа. Костная впадина - это точка опоры; сильная мышца, прикрепленная к кости рядом с впадиной, - это сила; а вес конечности вместе с любым сопротивлением, противодействующим ее движению, - это вес. Небольшое сокращение мышцы в этом случае приводит к значительному движению конечности: этот эффект особенно заметен при движении рук и ног в человеческом теле; очень незначительное сокращение мышц на плечах и бедрах придает размах конечностям, от которых организм получает столько активности.

Направляющая токарного станка представляет собой рычаг третьего рода. Шарнир, который прикрепляет его к полу, является точкой опоры, нога, приложенная к нему рядом с

шарниром, является силой, а рукоятка на оси маховика, с которой соединен его конец, является весом.

Щипцы представляют собой рычаги такого рода, как и ножницы, используемые при стрижке овец. В этих случаях сила передается рукой, расположенной непосредственно под точкой опоры, где соединяются два рычага.

(239.) Когда говорят, что мощность поддерживает вес с помощью рычага или любой другой машины, это означает только то, что мощность удерживает машину в равновесии и, таким образом, позволяет ей выдерживать вес. Необходимо обратить внимание на это различие, чтобы устранить трудность, которая может возникнуть из-за парадокса небольшой силы, поддерживающей большой вес.

В рычаге первого типа точка опоры F , [рис. 78](#), или ось, поддерживает объединенные силы власти и веса.

В рычаге второго типа, если предполагается, что сила воздействует на колесо R , [рис. 79](#), точка опоры F выдерживает давление, равное разнице между мощностью и весом, а ось колеса R выдерживает давление, равное удвоенной мощности; так что общее давление на F и R эквивалентно объединенным силам мощности и веса.

Для рычага третьего типа применимы аналогичные наблюдения. Колесо R , [рис. 80](#), выдерживает давление, равное удвоенной мощности, а точка опоры F выдерживает давление, равное разнице между мощностью и весом.

Эти факты могут быть установлены экспериментально путем прикрепления веревки к рычагу непосредственно над точкой опоры и подвешивания рычага за эту веревку к рычагу весов. Уравновешивающий вес, когда точка опоры удалена, будет в первом случае равен сумме веса и мощности, а в последних двух случаях равен их разнице.

(240.) До сих пор мы не рассматривали влияние веса самого рычага. Если центр тяжести рычага находится на вертикальной линии, проходящей через ось, вес инструмента не будет иметь никакого другого эффекта, кроме увеличения давления на ось на свою собственную величину. Но если центр тяжести находится по ту же сторону от оси, что и груз, как в точке G , это будет противодействовать действию силы, поэтому необходимо позволить определенной части которой поддерживать его. Чтобы определить, какая часть мощности при этом расходуется, следует учитывать, что момент веса рычага, собранный в точке G , определяется путем умножения этого веса на расстояние Gf . Момент той части мощности, которая поддерживает это, должен быть равен ему; следовательно, необходимо только найти, какая часть мощности, умноженная на Pf , будет равна весу рычага, умноженному на Gf . Это вопрос обычной арифметики.

Если центр тяжести рычага находится по другую сторону от оси груза, например, в точке G' , вес инструмента будет взаимодействовать с силой, поддерживающей вес W . Чтобы определить, какая часть веса W , таким образом, поддерживается весом рычага, необходимо только найти, какая часть веса W , умноженная на расстояние Wf , равна весу рычага, умноженному на $G'F$.

В этих случаях давление на точку опоры, как уже было подсчитано, всегда будет увеличиваться весом рычага.

(241.) Смысл, в котором говорится, что малая мощность выдерживает большой вес, и способ достижения этого объяснены, теперь мы рассмотрим, как эта мощность применяется для перемещения веса. Пусть P W , [рис. 81](#), будьте местами силы и веса, а F - местами точки опоры, и пусть сила будет уменьшена до P' , в то время как вес увеличен до W' . Пространство $P P'$, очевидно, имеет ту же пропорцию к $W W'$, что и плечо Pf к $W F$. Таким образом, если $P F$ будет в десять раз больше $W F$, $P P'$ будет в десять раз больше $W W'$. Мощность в один фунт при P , перемещаемая из P в P' , перенесет вес в десять фунтов из W в W' . Но в этом случае не следует говорить, что меньший вес перемещает больший, ибо нетрудно показать, что общая затрата силы при перемещении одного фунта от P к P' точно такая же, как при перемещении десяти фунтов от W к W' . Если пробел $P P'$ равен десяти дюймам, то пробел $W W'$ будет равен одному дюйму. Таким образом, груз в один фунт перемещается на десять последовательных дюймов, и на каждый дюйм затрачивается сила, достаточная для перемещения одного фунта на один дюйм. Общая затрата силы от P до P' в десять раз превышает силу, необходимую для перемещения одного фунта через один дюйм, или, что то же самое, это та сила, которая была бы необходима для перемещения десяти фунтов через один дюйм. Но это именно то, что достигается противоположным концом рычага W , поскольку вес W равен десяти фунтам, а расстояние $W W'$ равно одному дюйму.

Если бы вес W в десять фунтов можно было удобно разделить на десять равных частей по одному фунту каждая, каждую часть можно было бы отдельно приподнять на один дюйм без вмешательства рычага или какой-либо другой машины. В этом случае было бы израсходовано такое же количество энергии, и израсходовано таким же образом, как и в только что упомянутом случае.

Следовательно, очевидно, что когда машина используется для поднятия груза или преодоления сопротивления, на самом деле должно быть использовано такое же усилие, как если бы оно было немедленно приложено к грузу или сопротивлению. Все, что достигается машиной, заключается в том, чтобы позволить мощности выполнять это путем последовательности отдельных усилий, которые в противном случае должны быть выполнены одним усилием. Будет обнаружено, что эти наблюдения применимы ко всем машинам, какими бы они ни были.

(242.) Весовые машины почти всех видов, независимо от того, используются ли они в коммерческих или философских целях, являются разновидностями рычажных. Обычные весы, которые из всех весовых машин являются наиболее совершенными и наилучшим образом приспособлены для обычного использования, будь то в торговле или в философии экспериментов, представляют собой рычаг с равными плечами. На сталелитейном заводе один груз служит противовесом и мерой для других грузов разной величины, получая рычаг, изменяемый в зависимости от величины груза, против которого он действует. Подробное описание таких инструментов будет найдено в главе [XXI](#).

(243.) До сих пор мы рассматривали силу и вес как действующие на рычаг в направлениях, перпендикулярных его длине и параллельных друг другу. Это происходит не всегда. Пусть A B , [рис. 83](#), будем рычагом, точка опоры которого равна F , и пусть A_r - направление силы, а B_s - направление веса. Если линии Ra и Sb продолжить и провести перпендикуляры F_c и F_d от точки опоры к этим линиям, момент силы будет найден путем умножения мощности на линию F_c , а момент веса - путем умножения веса на $F D$. Если эти моменты равны, сила будет поддерживать вес в равновесии. ([185](#)).

Очевидно, что те же рассуждения будут применимы и тогда, когда плечи рычага не находятся в одном направлении. Эти рычаги могут иметь любую фигуру или очертания и могут располагаться относительно друг друга в любом положении.

(244.) В прямоугольном рычаге плечи перпендикулярны друг другу, а точка опоры F , [рис. 84](#), находится под прямым углом. В данном случае момент мощности равен P , умноженному на Af , а момент веса W , умноженный на $B F$. Когда инструмент находится в равновесии, эти моменты должны быть равны.

Когда молоток используется для забивания гвоздя, он представляет собой рычаг такого рода: коготь молотка - это более короткая рукоятка; сопротивление гвоздя - это вес; а рука, приложенная к рукоятке, - сила.

(245.) Когда балка опирается на две опоры A и B , [рис. 85](#), и поддерживает в некотором промежуточном месте C груз W , этот вес распределяется между опорами способом, который может быть определен уже объясненными принципами. Если давление на опору B рассматривать как силу, поддерживающую вес W с помощью рычага второго рода Ba , то эта сила, умноженная на Ba , должна быть равна весу, умноженному на CA . Следовательно, давление на B будет составлять ту же долю от веса, что и часть CA от AB . Таким же образом можно доказать, что давление на A составляет ту же долю веса, что и CB на AB . Таким образом, если A составляет одну треть, и, следовательно, B составляет две трети от AB , давление на B будет составлять одну треть веса, а давление на A - две трети веса.

Из этого рассуждения следует, что если груз находится посередине, на равном расстоянии от B и A , то каждая опора выдержит половину веса. Влияние веса самой балки можно определить, учитывая, что она собрана в центре тяжести. Следовательно, если эта точка находится на равном расстоянии от опор, вес балки будет равномерно распределен между ними.

В соответствии с этими принципами может быть установлено, каким образом нагрузка, переносимая на опоры между двумя опорами, распределяется между ними. Поскольку усилия носителей и направление веса всегда параллельны, положение шестов относительно горизонта не влияет на распределение веса между носителями. Независимо от того, поднимаются они, или опускаются, или перемещаются по ровной плоскости, вес будет одинаково распределен между ними.

Если балка выходит за пределы опоры, как показано на [рис. 86](#), при подвешивании груза в точке, не расположенной между ними, опоры должны быть установлены с разных сторон балки. Давление, которое они выдерживают, может быть рассчитано таким же образом, как и в первом случае. Давление опоры B можно рассматривать как силу, поддерживающую вес W с помощью рычага BC . Следовательно, давление B , умноженное на Ba , должно быть равно весу W , умноженному на AC . Следовательно, давление на B имеет такое же отношение к весу, как AC к AB . Таким же образом, рассматривая B как точку опоры, а давление опоры A как мощность, можно доказать, что давление A имеет такое же отношение к весу, как линия BC к AB . Следовательно, оказывается, что давление на опору A больше, чем вес.

(246.) Когда требуется большая мощность невозможно сконструировать длинный рычаг, можно использовать комбинацию рычагов. На [рис. 87](#) представлена такая система рычагов, состоящая из трех рычагов первого рода. Способ, которым воздействие мощности передается на груз, может быть исследован путем рассмотрения воздействия каждого

рычага последовательно. Мощность в точке Р создает направленную вверх силу в точке Р', которая относится к Р в той же пропорции, что и Р'f к Р F. Следовательно, эффект при Р' во столько раз больше мощности, во сколько линия Рf равна Р'F. Таким образом, если Рf в десять раз больше Р'F, то направленная вверх сила при Р' в десять раз больше мощности. Плечо Р' F' второго рычага прижимается вверх с силой, в десять раз превышающей мощность в точке Р. Таким же образом можно показать, что это приводит к эффекту при Р" во столько раз большему, чем Р', насколько Р'F' больше, чем Р" F'. Таким образом, если Р' F' будет в двенадцать раз больше Р" F', эффект при Р" будет в двенадцать раз больше, чем от Р'. Но это последнее было в десять раз мощнее, и, следовательно, Р" будет в сто двадцать раз мощнее. Таким же образом можно показать, что вес во столько же раз превышает эффект при Р", во сколько Р"F" больше, чем Wf". Если Р" F" будет в пять раз больше Wf", то вес будет в пять раз больше эффекта при Р". Но этот эффект в сто двадцать раз сильнее, и, следовательно, вес был бы в шестьсот раз больше мощности.

Таким же образом можно определить действие любой сложной системы рычагов, определив соотношение веса и мощности каждого рычага в отдельности и умножив эти числа вместе. В приведенном примере эти пропорции равны 10, 12 и 5, что при умножении вместе дает 600. На [рис. 87](#). рычаги, составляющие систему, относятся к первому виду; но принципы расчета не изменятся, если они будут второго или третьего рода, или некоторые из одного вида, а некоторые из другого.

(247.) То число, которое выражает отношение веса к уравнивающей мощности в любой машине, мы будем называть *мощностью машины*. Таким образом, если в рычаге сила в один фунт поддерживает вес в десять фунтов, мощность машины равна *десяти*. При мощности 2 фунта. выдерживает вес 11 фунтов., мощность машины составляет 5

	1
	2
, 2 содержится в 11 5	1
	2
	2

времена.

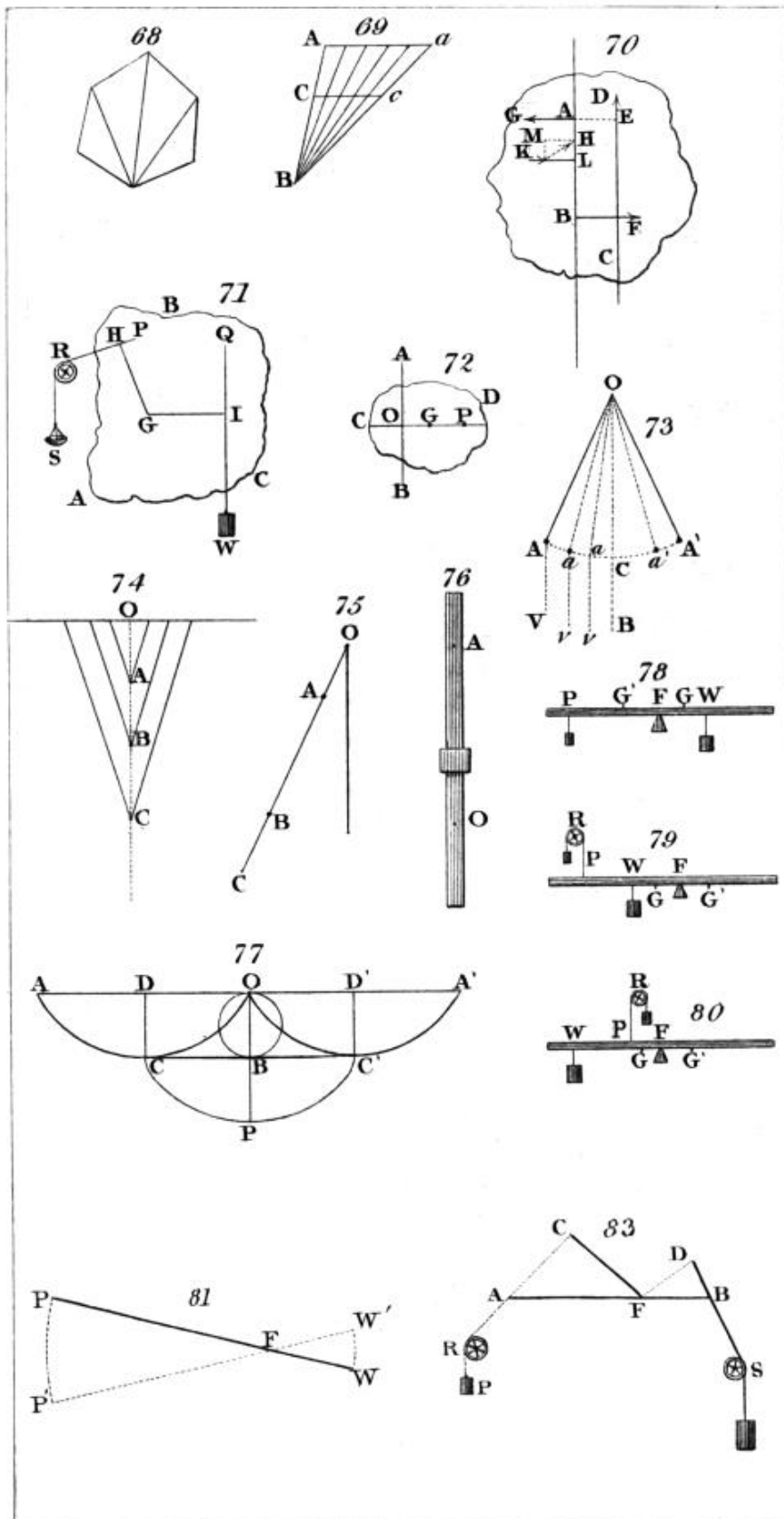
(248.) Поскольку расстояния мощности и веса от точки опоры рычага могут варьироваться по желанию и им придается любая заданная пропорция, всегда можно представить рычаг, обладающий мощностью, равной мощности любой данной машины. Такой рычаг можно назвать, применительно к этой машине, *эквивалентным рычагом*.

Поскольку каждая сложная машина состоит из ряда простых машин, действующих одна на другую, и поскольку каждая простая машина может быть представлена эквивалентным рычагом, сложная машина будет представлена сложной системой эквивалентных рычагов. Из того, что было доказано в ([246.](#)), следовательно, следует, что мощность сложной машины может быть вычислена путем умножения мощностей нескольких простых машин, из которых она состоит.

ГЛАВА XIV.

КОЛЕСНОЙ РАБОТЫ.

(249.) Когда рычаг применяется для поднятия груза или преодоления сопротивления, пространство, через которое он действует в любой момент времени, невелико, и работа должна выполняться последовательностью коротких и прерывистых усилий. На [рис. 81](#) после того, как груз был поднят из положения W в положение W' , рычаг должен снова вернуться в свое первоначальное положение, чтобы повторить действие. Во время этого возврата движение груза приостанавливается, и он будет падать вниз, если не будут приняты какие-либо меры для его поддержания. Таким образом, обычный рычаг используется только в тех случаях, когда требуется поднимать грузы через небольшие пространства, и в этих обстоятельствах его настоятельно рекомендует использовать его большая простота. Но там, где должно быть произведено непрерывное движение, например, при подъеме руды из шахты или при поднятии якоря судна, необходимо принять какое-нибудь приспособление, чтобы устранить прерывистое действие рычага и сделать его непрерывным. Различные формы, придаваемые рычагу с целью достижения этой цели, обычно обозначаются как *колесо и ось*.



Х. Адлард, Шотландия

Лондон, издательство Longman & Co.

На [рис. 88](#), Ab представляет собой горизонтальную ось, которая опирается на шарниры на своих концах или опирается на пескاري и способна вращаться. Вокруг этой оси намотан канат, который выдерживает вес W . На той же оси закреплено колесо C , вокруг которого в обратном направлении намотан канат, к которому присоединена мощность P . Момент мощности определяется путем умножения его на радиус колеса, а момент веса - путем умножения его на радиус его оси. Если эти моменты равны ([185](#)), машина будет находиться в равновесии. Отсюда следует, что мощность машины ([247.](#)) выражается отношением радиуса колеса к радиусу оси; или, что то же самое, диаметра колеса к диаметру оси. Этот принцип применим к колесу и оси во всех возможных формах, в которых они могут быть представлены.

(250.) Очевидно, что по мере того, как мощность непрерывно снижается и трос разматывается с колеса, груз будет постоянно подниматься, при этом трос, на котором он подвешен, одновременно наматывается на ось.

Когда машина находится в равновесии, силы, связанные как с весом, так и с мощностью, поддерживаются осью и распределяются между ее опорами способом, описанным в ([245.](#))

Когда машина используется для подъема груза, скорость, с которой движется сила, во столько раз превышает скорость, с которой поднимается вес, насколько сам вес больше мощности. Это принцип, который уже был замечен и который является общим для всех машин вообще. Следовательно, может быть доказано, что при подъеме груза затрачивается количество энергии, равное тому, которое было бы необходимо для подъема груза, если бы к нему немедленно была приложена мощность, без вмешательства какой-либо машины. Это было объяснено в случае рычага в ([241.](#)), и может быть объяснено в данном случае почти теми же словами.

За один оборот машины длина троса, смотанного с колеса, равна окружности колеса, и, следовательно, через это пространство должна перемещаться сила. В то же время длина троса, намотанного на ось, равна окружности оси, и через это пространство должен быть поднят груз. Следовательно, пространства, через которые одновременно перемещаются мощность и вес, пропорциональны окружностям колеса и оси; но эти окружности пропорциональны их диаметрам. Следовательно, скорость мощности будет относиться к скорости веса в той же пропорции, в какой диаметр колеса относится к диаметру оси, или, что то же самое, как вес относится к мощности ([249](#)).

(251.) Мы здесь опустили рассмотрение толщины веревки. Учитывая это, усилие должно рассматриваться как действующее в направлении центра каната, и поэтому толщину каната, поддерживающего привод, следует прибавить к диаметру колеса, а толщину каната, поддерживающего вес, - к диаметру оси. Это тем более необходимо учитывать, что прочность каната, необходимого для поддержания веса, приводит к тому, что его толщина находится в значительной пропорции к диаметру оси; в то время как канат, который поддерживает усилие, не требует такой же прочности и применяется к большему кругу, имеет очень незначительную пропорцию к его диаметру.

(252.) В многочисленных формах колеса и оси вес или сопротивление прилагаются с помощью веревки, намотанной на ось; но способ приложения силы очень различен, и не часто с помощью веревки. По окружности колеса иногда проходят выступающие штифты,

как показано на [рис. 88](#), к которому прикладывается рука для поворота механизма. Примером этого является штурвал, используемый в рулевом управлении судна.

В обычном *брашпилье* привод осуществляется с помощью *лебедки*, которая представляет собой прямоугольный рычаг, как показано на [фиг. 89](#). Рычаг Вс лебедки представляет собой радиус колеса, а мощность подается на Сd под прямым углом к Вс.

В некоторых случаях колесо не прикреплено к оси; но оно пронизано отверстиями, направленными к его центру, в которые непрерывно вставляются длинные рычаги, и непрерывное действие производится несколькими людьми, работающими одновременно; так что, пока одни переносят рычаги из отверстия в отверстие, другие управляют лебедкой.

Ось иногда устанавливается в вертикальное положение, при этом колесо или рычаги перемещаются горизонтально. *Шпиль* является примером этого: вертикальная ось закреплена на палубе судна; по окружности к ее центру проделаны отверстия. В эти отверстия вставляются длинные рычаги, как показано на [рис. 90](#). Люди, работающие со стержнем, постоянно ходят вокруг оси, нажимая на рычаги рядом со своими концами.

В некоторых случаях колесо вращается под действием веса животных, помещенных по его окружности, которые движутся вперед так же быстро, как колесо опускается, чтобы постоянно сохранять свое положение на краю горизонтального диаметра. *Беговая дорожка*, [рис. 91](#), и некоторые *краны*, такие как [рис. 92](#), являются примерами этого.

В водяных колесах мощность равна весу воды, содержащейся в ведрах по окружности, как показано на [рис. 93](#), который называется колесом с перерасходом: а иногда и за счет толчка воды о доски поплавок по окружности, как в колесе с перерасходом, [рис. 94](#). Оба эти принципа действуют в нагрудном колесе, [рис. 95](#).

В гребном колесе паровой лодки сила - это сопротивление, которое вода оказывает движению гребных досок.

В ветряных мельницах мощность - это сила ветра, действующая на различные части рычагов, и может рассматриваться как разные мощности, одновременно действующие на разные колеса, имеющие одну и ту же ось.

(253.) В большинстве случаев, когда используются колесо и ось, действие привода может время от времени приостанавливаться, и в этом случае необходимы некоторые приспособления для предотвращения отдачи груза. Храповое колесо R, [рис. 88](#), для этой цели предусмотрено приспособление, которое позволяет колесу вращаться в одном направлении; но защелка, которая попадает между зубьями неподвижного колеса, предотвращает его движение в другом направлении. Воздействие мощности или веса иногда передается на колесо или ось с помощью прямой планки, на краю которой приподняты зубья, которые входят в зацепление с соответствующими зубьями на колесе или оси. Такой стержень называется рейкой, и пример его использования можно наблюдать при работе поршней воздушного насоса.

(254.) Поскольку мощность колеса и оси выражается во столько раз, во сколько диаметр оси входит в диаметр колеса, очевидно, что есть только два способа увеличить эту мощность, а именно. либо путем увеличения диаметра колеса, либо уменьшения диаметра оси. В случаях, когда требуется большая мощность, каждый из этих методов сопряжен с практическими неудобствами и трудностями. Если диаметр колеса значительно увеличить, машина станет

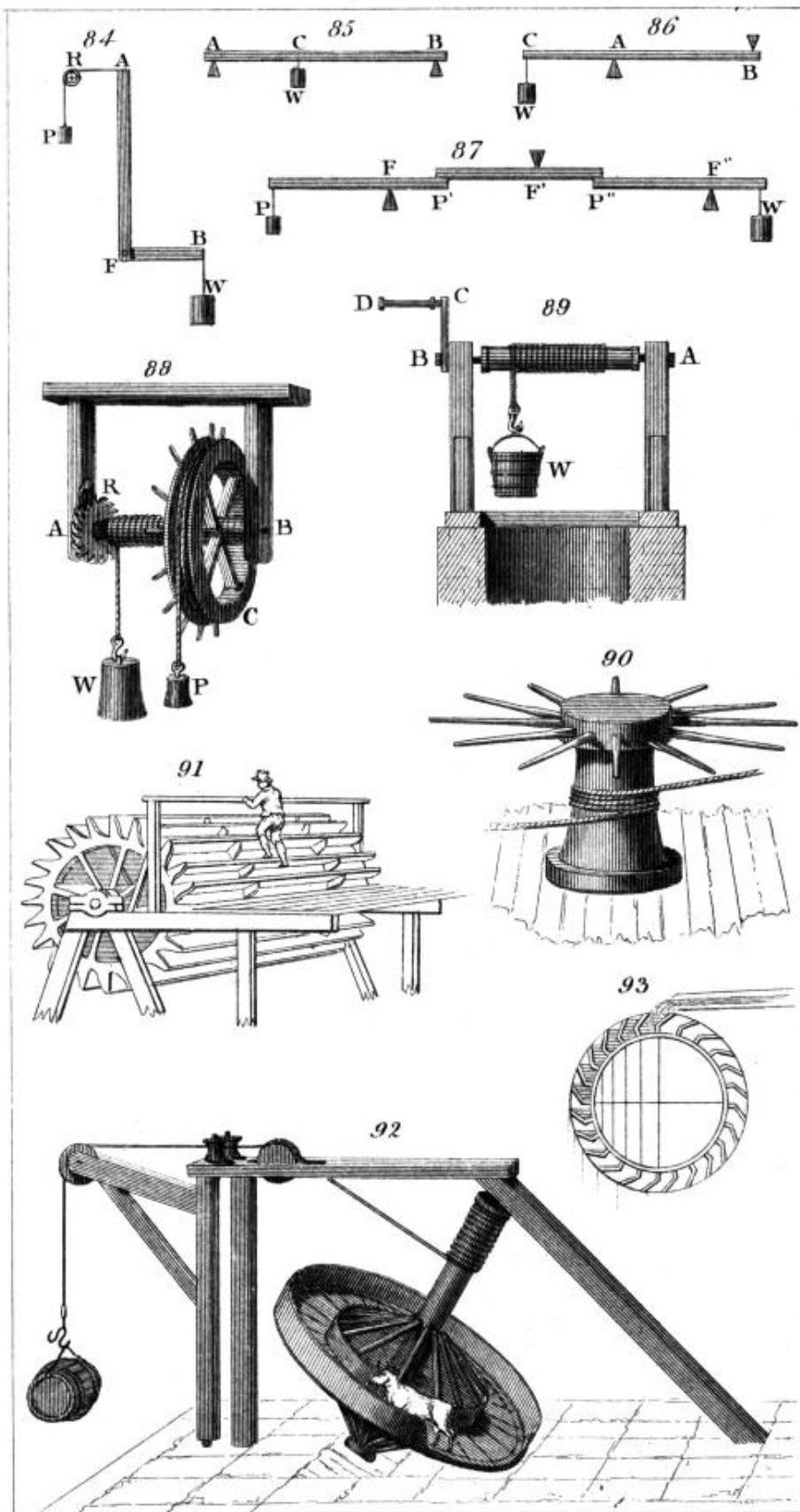
громоздкой, и мощность будет работать в неуправляемом пространстве. Если, с другой стороны, мощность машины увеличить за счет уменьшения толщины оси, прочность оси станет недостаточной для поддержания того веса, величина которого сделала необходимым увеличение мощности машины. Следовательно, сочетание требуемой прочности с умеренными размерами и большой механической мощностью практически невозможно при обычной форме колеса и оси. Это, однако, было достигнуто путем придания разной толщины разным частям оси и пропускания троса, намотанного на более тонкую часть, через колесо, прикрепленное к грузу, и наматывания его в противоположном направлении на более толстую часть, как показано на [фиг. 96](#). Чтобы исследовать соотношение мощности к весу в этом случае, представим [на рис. 97](#) изобразите сечение аппарата под прямым углом к оси. Вес в равной степени подвешен на двух частях веревки, S и S' , и поэтому каждая часть растягивается с силой, равной половине веса. Момент силы, растягивающей трос S , равен половине веса, умноженного на радиус более тонкой части оси. Эта сила, находящаяся по ту же сторону от центра, что и энергия, сотрудничает с ней в поддержании силы, которая растягивает S' и которая действует по другую сторону от центра. Согласно принципу, установленному в (185.), моменты P и S должны быть равны моментам S' ; и поэтому, если P умножить на радиус колеса и прибавить к половине веса, умноженного на радиус более тонкой части оси, мы должны получить сумму, равную половине веса, умноженного на радиус более толстой части оси. Отсюда легко понять, что мощность, умноженная на радиус колеса, равна половине веса, умноженного на разницу радиусов более толстой и более тонкой частей оси; или, что то же самое, мощность, умноженная на диаметр колеса, равна весу, умноженному на половину разницы диаметров более тонкой и более толстой частей оси.

Колесо и ось, сконструированные таким образом, эквивалентны обычным колесам, в которых колесо имеет тот же диаметр, а ось имеет диаметр, равный половине разницы диаметров более толстой и более тонкой частей. Мощность машины выражается отношением диаметра колеса к половине разницы этих диаметров; и, следовательно, эта мощность, когда задается диаметр колеса, зависит, как в случае обычного колеса и оси, не от малости оси, а от малости разницы между более тонкой и более толстой ее частями. Следовательно, ось может быть изготовлена такой толщины, чтобы придать ей всю необходимую прочность, и все же разница диаметров ее различных частей может быть настолько мала, чтобы придать ей всю необходимую мощность.

(255.) Часто бывает так, что приходится поднимать разный вес или преодолевать сопротивление с помощью одинаковой силы. Если бы в таком случае груз поднимался с помощью веревки, намотанной на единую ось, действие силы не было бы равномерным, а менялось бы в зависимости от веса. Однако в большинстве случаев желательно или необходимо, чтобы вес или сопротивление, даже если они изменяются, перемещались равномерно. Это будет достигнуто, если каким-либо образом заставить рычаг веса увеличиваться в той же пропорции, в какой уменьшается вес, и уменьшаться в той же пропорции, в какой увеличивается вес: ибо в этом случае момент веса никогда не изменится, все, что он приобретает за счет увеличения веса, теряется за счет уменьшения рычага, и все, что он теряет за счет уменьшения веса, приобретает за счет увеличения рычага. Ось, поверхность которой изогнута таким образом, что толщина, на которую наматывается канат, постоянно увеличивается или уменьшается в той же пропорции, в какой уменьшается или увеличивается вес или сопротивление, будет производить этот эффект.

Очевидно, что все, что было сказано относительно переменного веса или сопротивления, также применимо к переменной мощности, которая, следовательно, может быть использована теми же средствами для получения равномерного эффекта. Пример тому - часы, которые приводятся в движение спиральной пружиной. Когда часы заведены, эта пружина действует с наибольшей интенсивностью, и по мере того, как часы опускаются, сила упругости пружины постепенно теряет свою энергию. Эта пружина соединена цепью с осью различной толщины, называемой *предохранителем*. Когда пружина работает с наибольшей силой, цепь воздействует на самую тонкую часть предохранителя, а когда она разматывается, она воздействует на часть предохранителя, толщина которой постоянно увеличивается, при этом пружина теряет свою упругость точно в той же пропорции. Изображение предохранителя и цилиндрической коробки, содержащей пружину, приведено на [рис. 98.](#), а самой пружины - на [рис. 99.](#)

(256.) Когда требуется большая мощность, колеса и оси могут быть объединены способом, аналогичным сложной системе рычагов, описанной в [\(246.\)](#) В этом случае мощность воздействует на окружность первого колеса, и ее воздействие передается на окружность первой оси. Эта окружность соединяется с окружностью второго колеса, и эффект, таким образом, передается на окружность второй оси, и так далее. Из того, что было доказано в [\(248.\)](#), очевидно, что мощность такой комбинации колес и осей будет найдена путем умножения мощностей нескольких колес, из которых она состоит. Иногда удобно вычислять эту мощность с помощью чисел, выражающих пропорции окружностей или диаметров нескольких колес к окружностям или диаметрам нескольких осей соответственно. Это вычисление производится путем первого умножения чисел, выражающих окружности или диаметры колес, а затем умножения чисел, выражающих окружности или диаметры нескольких осей. Соотношение двух продуктов будет выражать мощность машины. Таким образом, если длины окружностей или диаметры соответствуют числам 10, 14 и 15, их произведение будет равно 2100; и если длины окружностей или диаметры осей выражены числами 3, 4 и 5, их произведение будет равно 60, а мощность машины будет выражена соотношением 2100 и 60, или 35 к 1.



Х. Адлард, Шотландия

Лондон, издательство Longman & Co.

(257.) Способ, которым окружности осей воздействуют на окружности колес при составном колесообразовании, различен. Иногда ремень или шнур накладывают на канавку по окружности оси и проводят по аналогичной канавке по окружности следующего колеса. Трение этого шнура или планки о канавку является достаточным для предотвращения его скольжения и передачи усилия от оси к колесу или *наоборот*. Этот способ соединения колесных опор представлен на [рис. 100](#).

Многочисленные примеры колес и осей, приводимых в движение ремнями или тросами, встречаются в машинах, применяемых практически во всех областях искусства и мануфактур. В токарном станке колесо, обрабатываемое педалью, соединено с оправкой кетгутовым шнуром, проходящим через пазы в колесе и оси. На всех крупных фабриках вращающиеся валы проходят вдоль помещений, к которым через определенные промежутки времени прикреплены ремни, проходящие по их окружности и обхватывающие колеса, которые приводят в движение несколько машин. Если требуется, чтобы колеса, соединенные ремнями или шнурами, вращались в одном направлении, эти шнуры располагаются так, как показано на [рис. 100](#); но если требуется, чтобы они вращались в противоположных направлениях, они применяются так, как показано на [рис. 101](#).

Одно из главных преимуществ метода передачи движения между колесами и осями с помощью ремней или шнуров состоит в том, что колесо и ось могут располагаться на любом удобном расстоянии друг от друга и могут поворачиваться либо в одном, либо в противоположных направлениях.

(258.) Когда окружность колеса непосредственно воздействует на окружность следующей оси, обязательно должны быть приняты какие-либо средства для предотвращения перемещения колеса в контакте с осью без принуждения последней к повороту. Если бы поверхности обоих были идеально гладкими, так что все трения были устранены, очевидно, что любой из них скользил бы по поверхности другого, не сообщая ему движения. Но, с другой стороны, если бы на этих поверхностях были какие-либо неровности, какими бы маленькими они ни были, они оказались бы вставленными друг в друга, и ни колесо, ни ось не могли бы двигаться без того, чтобы неровности, которыми усеян его край, не столкнулись с неровностями, выступающими с поверхности другого; и таким образом, до тех пор, пока эти выступы не будут отломаны, и колесо, и ось должны перемещаться одновременно. Именно по этой причине, если поверхности колес и осей каким-либо образом придать шероховатости и прижать друг к другу с достаточной силой, движение одного из них приведет к вращению другого, при условии, что нагрузка или сопротивление не будут превышать силу, необходимую для разрушения этих маленьких выступов, которые создают трение.

В тех случаях, когда не требуется большой мощности, движение передается таким образом через цепочку колесных механизмов путем придания поверхности колеса и оси шероховатости либо путем облицовки их кожей из буйволиной кожи, либо деревом, вырезанным поперек волокон. Этот метод иногда используется в прядильных машинах, где одно большое полированное колесо, расположенное в горизонтальном положении, вращается в контакте с несколькими маленькими полированными роликами, каждый из которых передает движение шпинделю. Положение колеса W и роликов R R и т.д. показано на [рис. 102](#). Каждый ролик можно выбросить из контакта с колесом и восстановить на нем по своему усмотрению.

Передача движения между колесами и осями посредством трения имеет преимущество в большой плавности и равномерности и в том, что происходит с небольшим шумом; но этот метод может быть использован только в случаях, когда сопротивление не очень значительно, и поэтому редко применяется при работах большого масштаба. Доктор Грегори упоминает пример лесопилки в Саутгемптоне, где колеса взаимодействуют друг с другом за счет соприкосновения концевых волокон древесины. Оборудование производит очень мало шума и очень хорошо изнашивается, поскольку использовалось не менее 20 лет.

(259.) Наиболее обычным методом передачи движения через цепочку колес является формирование зубьев по их окружности, так что эти углубления каждого колеса попадают между соответствующими углублениями того, в котором оно работает, и обеспечивают действие до тех пор, пока напряжение не будет настолько велико, чтобы сломать зуб.

При формировании зубьев необходимо уделять самое пристальное внимание их форме, чтобы движение могло передаваться от колеса к колесу плавно и единообразно. Этого можно достичь, только придав зубам форму в соответствии с кривыми особого рода, которые изобрели математики, и установив правила рисования. Пагубные последствия пренебрежения этим будут очень очевидны при рассмотрении характера воздействия, которое было бы произведено, если бы зубья были сформированы из квадратных выступающих штифтов, как на [рис. 103](#). Когда зуб А соприкасается с В, он воздействует на него косо, и при его движении угол В скользит по плоской поверхности А таким образом, что создает сильное трение и стирает боковую часть А и конец В. Приближаясь к положению С D, они испытывают толчок в тот момент, когда их поверхности полностью соприкасаются; а после прохождения положения С D тот же самый скребущий и скрежещущий эффект возникает в противоположном направлении, пока при вращении колес зубья не расцепятся. Этих эффектов можно избежать, придав зубам изогнутую форму, представленную на [рис. 104](#). Таким образом, поверхности зубьев катятся друг по другу с очень незначительным трением, и направление, в котором создается давление, всегда соответствует линии Мп, касающейся двух колес и проходящей под прямым углом к радиусам. Таким образом, давление, которое всегда одинаково и действует с использованием одного и того же рычага, дает одинаковый эффект.

(260.) Когда колеса работают вместе, их зубья обязательно должны быть одинакового размера, и поэтому пропорцию их окружности всегда можно оценить по количеству зубьев, которые они несут. Отсюда следует, что при вычислении мощности вращения составного колеса количество зубьев всегда может быть использовано для выражения соответственно окружностей или диаметров, которые пропорциональны этим окружностям. Когда зубья поднимаются на оси, это обычно называется *шестерней*, и в этом случае зубья называются *листьями*. Правило для вычисления последовательности действий колеса, приведенное в (256.), будет выражено следующим образом: когда колесо и ось имеют зубья, умножьте вместе количество зубьев в каждом из колес, а затем количество лепестков в каждой из шестерен; соотношение двух произведений будет выражать мощность машины. Если некоторые колеса и оси имеют зубья, а другие нет, это вычисление может быть произведено путем использования для тех окружностей, на которых нет зубьев, количества зубьев, которое их заполняло бы. [Рис. 105](#) представляет собой цепочку из трех колес и шестерен. Колесо F, на которое приходится сила, и ось, на которую приходится вес, не имеют зубьев; но легко определить количество зубьев, которое они могли бы нести.

(261.) Очевидно, что каждая шестерня вращается гораздо чаще за заданное время, чем колесо, которое она приводит в движение. Таким образом, если шестерня С снабжена десятью зубьями, а колесо Е, которое она приводит в движение, имеет шестьдесят зубьев, шестерня С должна провернуться шесть раз, чтобы повернуть колесо Е один раз. Следовательно, скорости вращения каждого колеса и шестерни, которые взаимодействуют друг с другом, будут иметь ту же пропорцию, что и количество их зубьев, взятых в обратном порядке, и благодаря этому относительная скорость вращения колес и шестерен может быть определена в соответствии с любой предлагаемой скоростью.

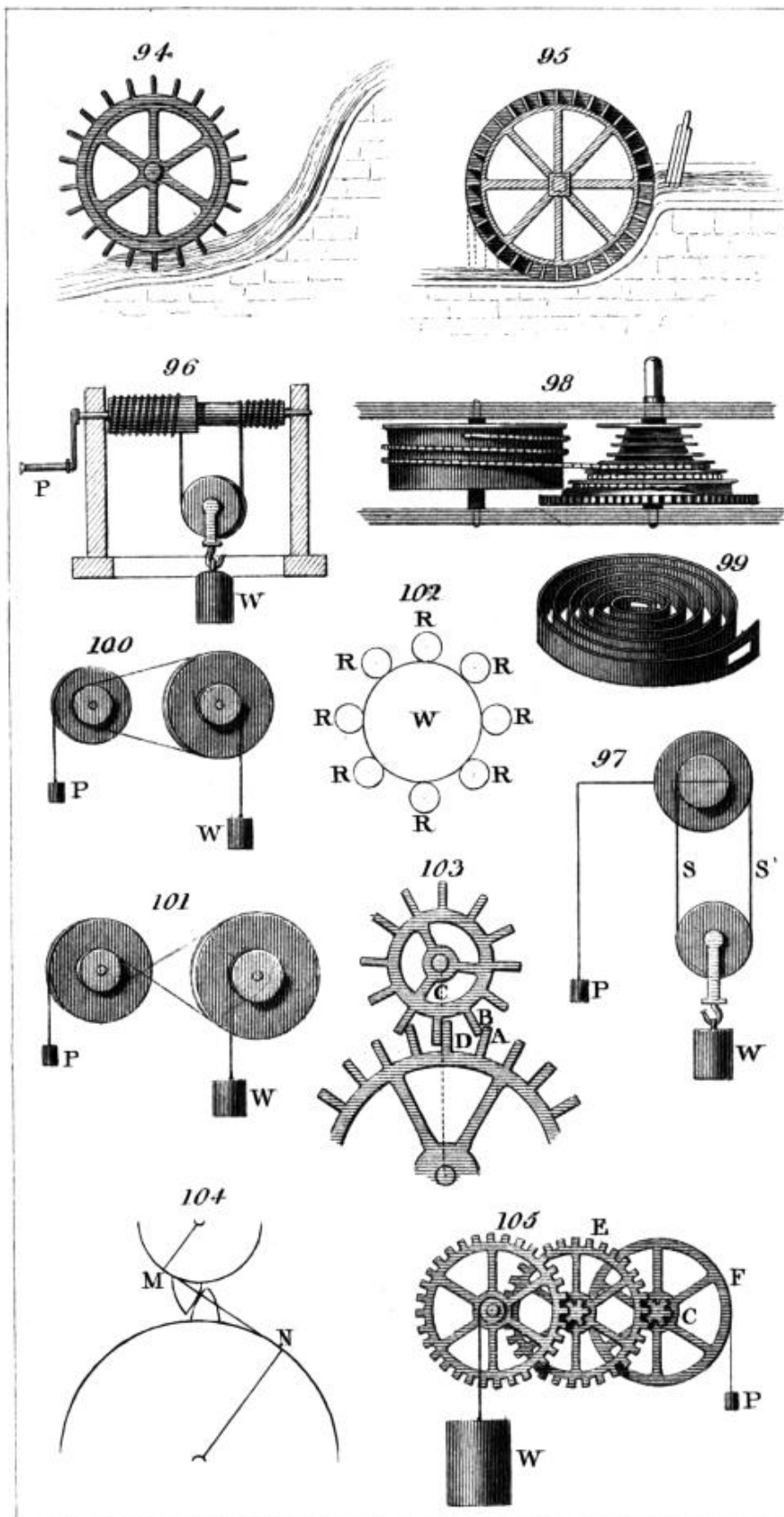
Колесный механизм, как и все другие механизмы, используется для передачи и изменения силы во всех областях искусства и мануфактур; но он также используется в тех случаях, когда целью является само движение, а не сила. Наиболее примечательный пример этого имеет место в часах и часовом механизме, где цель состоит просто в том, чтобы производить равномерные вращательные движения, имеющие определенные пропорции, и без какого-либо учета подъема грузов или преодоления сопротивлений.

(262.) *Кран* - это пример комбинации колесных механизмов, используемых для подъема или опускания больших грузов. [На рис. 106.](#) представлена машина такого типа. АВ - это прочная вертикальная балка, опирающаяся на ось и закрепленная в своем положении балками в полу. Однако он способен вращаться вокруг своей оси, будучи зажатым между роликами, прикрепленными к балкам и закрепленными в полу. СD - это выступающий рычаг, называемый *гибом*, образованный из балок, которые врезаны в букву В. Привод установлен на двух чугунных крестовинах, прикрепленных болтами с каждой стороны балок, одна из которых расположена в точке EFGH. Лебедка, к которой подается питание, расположена в точке I. Она несет шестерню непосредственно за H. Эта шестерня приводится в действие колесом K, которое несет на своей оси другую шестерню. Эта последняя шестерня приводится в действие большим колесом L, которое вращает вокруг своей оси цилиндр M, на который намотана цепь или канат. Цепь проходит через шкив D в верхней части гибки. На конце цепи прикреплен крюк O для поддержки груза W. Во время подъема груза удобно, чтобы предотвращалась его отдача в случае случайного отключения питания. Это достигается с помощью храпового колеса, прикрепленного к цилиндру M, как описано в [\(253.\)](#); но когда груз W должен быть опущен, фиксатор должен быть снят с этого храпового колеса. В этом случае слишком быстрое опускание груза в некоторых случаях сдерживается давлением, оказываемым на какую-либо часть приводного механизма, чтобы создать достаточное трение для замедления спуска в любой требуемой степени или даже приостановить его, если это необходимо. Вертикальная балка в точке В, опирающаяся на ось поворота и закрепленная между роликами, позволяет поворачивать балку в любом направлении; таким образом, груз, поднятый с одной стороны крана, может быть перенесен и помещен на другую сторону на любое расстояние в пределах досягаемости балки. Таким образом, если установить кран на причале рядом с судном, грузы могут быть подняты, а при подъеме их можно повернуть так, чтобы они могли опуститься в трюм.

Мощность этой машины может быть рассчитана на основе уже объясненных принципов. Величина окружности, по которой перемещается мощность в точке I, может быть определена радиусом лебедки, и, следовательно, можно определить количество зубьев, которые могло бы иметь колесо такого размера. Аналогичным образом мы можем

определить количество лепестков в шестерне, величина которой была бы равна цилиндру М. Пусть первое число будет умножено на количество зубьев в колесе К, а это произведение - на количество зубьев в колесе L. Затем пусть количество лепестков в шестерне Н будет умножено на количество лепестков в шестерне, прикрепленной к оси колеса К, и пусть это произведение будет умножено на количество лепестков в шестерне, диаметр которой равен диаметру цилиндра М. Эти два продукта будут выражать мощность машины.

(263.) Зубчатые колеса бывают трех видов, различающихся положением зубьев относительно оси колеса. Когда они приподняты над краем колеса, как показано на [рис. 105](#), их называют *цилиндрическими колесами* или *цилиндрической шестерней*. Когда они подняты параллельно оси, как на [рис. 107](#), это называется *корончатым колесом*. Когда зубья поднимаются на поверхности, наклоненной к плоскости колеса, как на [рис. 108](#), они называются *скошенными колесами*.



Х. Адлард, Шотландия

Лондон, издательство Longman & Co.

Если движение вокруг одной оси должно быть передано другой оси, параллельной ей, обычно используется цилиндрическая передача. Таким образом, на [рис. 105](#) три оси параллельны друг другу. Если движение вокруг одной оси должно быть передано другой под прямым углом к ней, то подойдет корончатое колесо, работающее в цилиндрической шестерне, как на [рис. 107](#). Или же один и тот же объект может быть получен с помощью двух скошенных колес, как показано на [рис. 108](#).

Если требуется передать движение вокруг одной оси другой, наклоненной к ней под любым предполагаемым углом, всегда можно использовать два скошенных колеса. На [рис. 109](#) пусть Ab и Ac будут двумя осями; два скошенных колеса, такие как De и Ef , на этих осях будут передавать движение или вращение от одного к другому, и относительная скорость может, как обычно, регулироваться пропорциональной величиной колес.

(264.) Для выравнивания износа зубьев колеса и шестерни, которые взаимодействуют друг с другом, необходимо, чтобы каждая пластинка шестерни последовательно проходила через каждый зуб колеса, а не воздействовала постоянно на один и тот же набор зубьев. Если бы зубьям можно было придавать точную форму в соответствии с математическими принципами, а материалы, из которых они изготовлены, были бы идеально однородными, эта предосторожность была бы менее необходимой; но поскольку неизбежно должны существовать небольшие различия как в материале, так и в форме, их последствия следует, насколько это возможно, выровнять, распределив их по всем частям колеса. Для этой цели обычно, особенно при фрезеровании, где используется значительное усилие, для регулирования соотношения числа зубьев в колесе и шестерне, одна и та же пластина шестерни не должна дважды входить в зацепление с каким-либо одним зубом колеса до тех пор, пока не завершится действие ряда зубьев, выраженное произведением числа зубьев в колесе и шестерне. Предположим, что шестерня содержит десять лепестков, которые мы обозначим цифрами 1, 2, 3 и т. д., и что колесо содержит 60 зубьев, обозначенных аналогичным образом. В начале движения предположим, что лепесток 1 шестерни входит в зацепление с зубом 1 колеса; затем после одного оборота лепесток 1 шестерни входит в зацепление с зубом 11 колеса, а после двух оборотов лепесток 1 шестерни входит в зацепление с зубом 21 колеса; и аналогичным образом, после 3, 4 и 5 оборотов шестерни лепесток 1 последовательно входит в зацепление с зубьями 31, 41 и 51 колеса. После шестого оборота лепесток 1 шестерни снова войдет в зацепление с зубом 1 колеса. Таким образом, очевидно, что в предполагаемом здесь случае лепесток 1 шестерни будет постоянно находиться в зацеплении с зубьями 1, 11, 21, 31, 41, и 51 колеса, и никакими другими. То же самое можно сказать о каждом листочке шестерни. Таким образом, лепесток 2 шестерни будет последовательно входить в зацепление с зубьями 2, 12, 22, 32, 42, и 52 колеса, и никакими другими. Следовательно, любые случайные неровности этих зубьев будут постоянно воздействовать друг на друга до тех пор, пока окружность колеса не будет разделена на части по десять зубьев в каждой, неравномерно изношенных. Этого эффекта можно было бы избежать, если бы у колеса или шестерни было на один зуб больше или на один зуб меньше. Таким образом, предположим, что колесо имеет не шестьдесят зубьев, а шестьдесят один, тогда после шести оборотов шестерни лепесток 1 шестерни войдет в зацепление с зубом 61 колеса; и после одного оборота колеса лепесток 2 шестерни войдет в зацепление с зубом 1 колеса. Таким образом, во время первого оборота колеса лепесток 1 шестерни будет последовательно входить в зацепление с зубьями 1, 11, 21, 31, 41, 51, и 61 колеса: в начале второго оборота колеса лепесток 2 шестерни будет входить в зацепление с

зубом 1 колеса; и во время второго оборота колеса лепесток 1 шестерни будет последовательно входить в зацепление с зубьями 10, 20, 30, 40, 50, и 60 от колеса. Таким же образом можно показать, что при третьем обороте колеса лепесток 1 шестерни будет последовательно входить в зацепление с зубьями 9, 19, 29, 39, 49, и 59 колеса: во время четвертого оборота колеса лепесток 1 шестерни будет последовательно входить в зацепление с зубьями 8, 18, 28, 38, 48, и 58 колеса. Продолжая это рассуждение, окажется, что во время десятого оборота колеса лепесток 1 шестерни будет последовательно входить в зацепление с зубьями 2, 12, 22, 32, 42, и 52 колеса. В начале одиннадцатого оборота колеса лепесток 1 шестерни войдет в зацепление с зубом 1 колеса, как и в начале движения. Следовательно, очевидно, что в течение первых десяти оборотов колеса каждая пластинка шестерни последовательно входила в зацепление с каждым зубом колеса, и что в течение этих десяти оборотов шестерня провернулась шестьдесят один раз. Таким образом, лепестки шестерни воздействуют на зубья колеса шестьсот десять раз, прежде чем два зуба могут воздействовать друг на друга дважды.

Странный зуб, который производит этот эффект, мастера называют *охотничьим зубцом*.

(265.) Наиболее известным случаем, когда привод колеса используется просто для создания и регулирования движения, без какой-либо привязки к поднимаемым грузам или преодолеваемым сопротивлениям, является случай хронометров. В работе с часами цель состоит в том, чтобы заставить колесо вращаться с равномерной скоростью и с определенной частотой. Движение этого колеса обозначается указательным пальцем или стрелкой, помещенной на его ось и вращающейся вместе с ним. Пропорционально длине руки круг, по которому играет ее конец, увеличивается, и ее движение становится более ощутимым. Этот круг разделен, так что можно точно наблюдать очень малые доли оборота стрелки. В большинстве хронометров требуется приводить в движение две стрелки, а иногда и три. Эти движения происходят с разной скоростью, в соответствии с общепринятыми временными интервалами. Одно колесо вращается за минуту, неся на себе руку, которая вращает круг, разделенный на шестьдесят равных частей; движение руки над каждой частью составляет одну секунду, а полный оборот руки совершается за одну минуту. Другое колесо вращается один раз, в то время как первое вращается шестьдесят раз; следовательно, рука, несущая это колесо, вращается один раз в шестьдесят минут или в один час. Круг, на котором он играет, как и первый, разделен на шестьдесят равных частей, и движение руки над каждой частью выполняется за одну минуту. Обычно это называется *минутной стрелкой*, а первая - *секундной стрелкой*.

Третье колесо вращается один раз, в то время как то, которое несет минутную стрелку, вращается двенадцать раз; следовательно, это последнее колесо, которое несет *часовую стрелку*, вращается со скоростью в двенадцать раз меньшей, чем у минутной стрелки, и, следовательно, в семьсот двадцать раз меньшей, чем у секундной стрелки. Теперь мы попытаемся объяснить, каким образом эти движения производятся и регулируются. Пусть A, B, C, D, E , [рис. 110](#), представляют собой цепочку колес, а a, b, c, d представляют их шестерни, e представляет собой цилиндр на оси колеса E , вокруг которого намотан трос, поддерживающий груз W . Пусть действию этого веса, передаваемого через цепочку колес, противостоит сила P , действующая на колесо A , и пусть предполагается, что эта сила имеет такую природу, чтобы приводить вес W к смещению. спускайтесь с равномерной скоростью и с любой предложенной скоростью. Колесо E имеет по своей окружности восемьдесят

четыре зуба. Колесо D имеет восемьдесят зубьев; колесо C также оснащено восемьюдесятью зубьями, а колесо B - семьюдесятью пятью. Шестерни *d* и *c* снабжены каждая двенадцатью листьями, а шестерни *b* и *a* - десятью.

Если мощность в точке P регулировать таким образом, чтобы колесо A совершало оборот один раз в минуту с равномерной скоростью, рука, прикрепленная к оси этого колеса, будет служить *секундной стрелкой*. Шестерня *a* с десятью зубьями должна провернуться семь с половиной раз, чтобы произвести один оборот B, следовательно, пятнадцать оборотов колеса A произведут два оборота колеса B; следовательно, колесо B совершает два оборота за пятнадцать минут. Шестерня *b* должна провернуться восемь раз, чтобы произвести один оборот колеса C, и, следовательно, колесо C должно провернуться один раз за четыре четверти часа или за один час. Если к оси этого колеса прикрепить стрелку, то она будет совершать движение, необходимое для минутной стрелки. Шестерня *c* должна провернуться шесть раз и на две трети, чтобы произвести один оборот колеса D, и, следовательно, это колесо должно провернуться один раз за шесть часов и две трети. Шестерня *d* вращается семь раз за один оборот колеса E, и, следовательно, колесо E будет вращаться один раз за сорок шесть часов и две трети.

На оси колеса C может быть установлена вторая шестерня с семью лепестками, которая может приводить в движение колесо с восемьюдесятью четырьмя зубьями, так что это колесо должно поворачиваться один раз за двенадцать оборотов колеса C. Если на оси зафиксировать стрелку, то эта стрелка совершит один оборот за двенадцать оборотов минутной стрелки, установленной на оси колеса C; то есть она совершит один оборот за двенадцать часов. Если она заиграет на циферблате, разделенном на двенадцать равных частей, то за час переместится на каждую часть и будет служить часовой стрелке хронометра.

Здесь мы предположили, что секундная, минутная и часовая стрелки движутся на отдельных циферблатах. В этом, однако, нет необходимости. Ось часовой стрелки обычно представляет собой трубку, внутри которой находится ось минутной стрелки, так что для обеих используется один и тот же циферблат. Секундная стрелка, однако, обычно снабжена отдельным циферблатом.

(266.) Теперь мы объясним способ приложения усилия к колесу A, чтобы регулировать и выравнивать воздействие веса W. Предположим, что колесо A снабжено тридцатью зубьями, как показано на [рис. 111](#); если ничто не препятствует движению, груз W опускался бы с увеличенной скоростью и сообщал бы ускоренное движение колесу A. Этот эффект, однако, прерывается следующим приспособлением: —Lm представляет собой маятник, колеблющийся в центре L и регулируемый таким образом, что время его колебания составляет одну секунду. Поддоны I и K соединены с маятником таким образом, чтобы совершать колебания вместе с ним. В положении маятника, представленном на рисунке, поддон I останавливает движение колеса A и полностью приостанавливает действие груза W, [рис. 110](#), так что на мгновение вся машина становится неподвижной. Однако груз M под действием силы тяжести опускается в самое нижнее положение и отсоединяет поддон I от зуба колеса. Затем начинает действовать вес W, и колесо A поворачивается от A к B. Тем временем маятник M совершает колебания в другую сторону, и поддон K попадает под зуб колеса A и на мгновение останавливает его дальнейшее движение. При возвратной вибрации поддон K снова выходит из зацепления и позволяет зубу колеса выйти из

зацепления, и под действием веса W проходит еще один зуб, прежде чем движение колеса A снова проверяется перемещением поддона I .

Из этого объяснения следует, что при двух колебаниях маятника один зуб колеса A проходит поддон I , и, следовательно, если колесо A будет снабжено 30 зубьями, ему будет позволено совершить один оборот за 60 колебаний маятника. Таким образом, если отрегулировать маятник так, чтобы он колебался секунды, то это колесо будет вращаться один раз в минуту. Из-за действия поддонов, контролирующих движение колеса A и позволяющих его зубьям поочередно выходить из положения, это было названо *пусковым колесом*; а колесо и поддоны вместе обычно называются *пусковым механизмом* или *"гребнем"*.....

Мы уже объясняли, что из-за трения о точки опоры и по другим причинам качание маятника постепенно уменьшалось бы, и его вибрация в конце концов прекратилась бы. Этому, однако, препятствует воздействие зубьев отбойного колеса на поддоны, которого как раз достаточно для передачи маятнику той силы, которая необходима для противодействия замедляющим эффектам и поддержания его движения. Таким образом, оказывается, что, хотя действие тяжести груза W , приводящего в движение машину, через определенные промежутки времени приостанавливается, все же эта часть силы не теряется, поскольку в течение этих промежутков используется для придания маятнику всего того движения, которое он потерял бы из-за сопротивлений, которым он неизбежно подвергается.

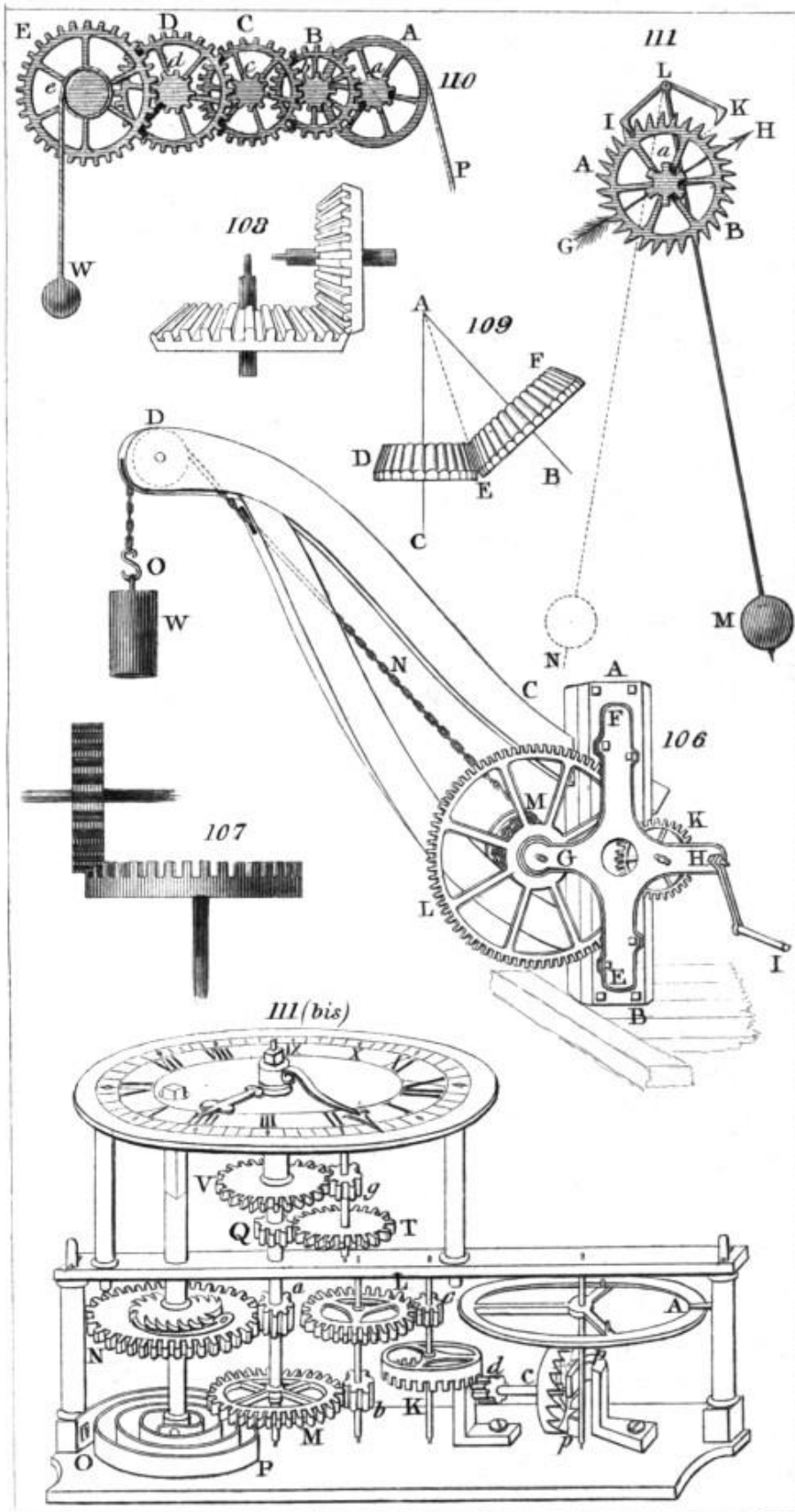
В стационарных часах и в других случаях, когда объем машины не является препятствием, в качестве движущей силы используется опускающийся груз. Но в часах и портативных хронометрах это было бы сопряжено с очевидными неудобствами. В таких случаях движущей силой является спиральная пружина, называемая *главной пружиной*. Способ, которым эта пружина сообщает вращение оси, и оригинальный метод выравнивания эффекта ее переменной упругости путем придания ей рычага, который увеличивается по мере уменьшения силы упругости, уже были объяснены. (255.)

Аналогичное возражение выдвигается против использования маятника в портативных хронометрах. На его место устанавливается спиральная пружина аналогичного типа, но бесконечно более тонкая, называемая *волосной пружиной*. Эта пружина соединена с хорошо сбалансированным колесом, называемым *балансиром*, которое вращается. Когда это колесо поворачивается до определенной степени в одном направлении, волосная пружина сворачивается, и ее эластичность заставляет колесо откатываться и возвращаться в положение, в котором энергия пружины действует в противоположном направлении. Затем балансирующее колесо возвращается на место и продолжает вибрировать таким же образом. Ось этого колеса снабжена поддонами, аналогичными поддонам маятника, которые поочередно входят в зацепление с зубьями корончатого колеса, которое заменяет уже описанное опорное колесо.

Общий вид работы обычных часов представлен на [рис. 111](#). бис. A - балансирующее колесо, несущее на своей оси поддоны p и r ; C - заводное колесо, зубья которого поочередно выходят из-под этих поддонов способом, уже описанным в разделе "Устройство часов". На оси корончатого колеса размещена шестерня d , которая приводит в движение другое корончатое колесо K . На оси этой размещена шестерня s , которая играет в зубьях третьего

колеса L. Шестерня *b* на оси L находится в зацеплении с колесом M, называемым центральным колесом. Ось этого колеса проходит через центр циферблата. На нем установлена шестерня *a*, которая приводится в движение большим колесом N. На это колесо немедленно действует главная пружина. Ор - это боевая пружина, лишенная своего цилиндра. Ось колеса M, проходящая через центр циферблата, на конце придана квадратной форме для размещения минутной стрелки. На этой оси установлена вторая шестерня Q, которая приводит в движение колесо T. На оси этого колеса установлена шестерня *g*, которая приводит в движение часовое колесо V. Это колесо установлено на трубчатой оси, которая включает в себя ось колеса M. Эта трубчатая ось, проходящая через центр циферблата, несет часовую стрелку. Колеса A, B, C, D, E, [рис. 110.](#), соответствуют колесам C, K, L, M, N, [рис. 112.](#); а шестерни *a, b, c, d, e*, [рис. 109.](#), соответствуют шестерням *d, c, b, a*, [рис. 111.](#) Из того, что уже было объяснено относительно этих колес, будет очевидно, что колесо M, [рис. 111.](#), вращается один раз в час, заставляя минутную стрелку один раз за это время совершить оборот по циферблату. Это колесо одновременно вращает шестерню Q, которая приводит в движение колесо T. Это колесо снова поворачивает шестерню *g*, которая приводит в движение часовое колесо V. Лепестки и зубья этих шестерен и колес имеют пропорции, как уже объяснялось, так что колесо V вращается один раз за двенадцать оборотов колеса M. Таким образом, часовая стрелка, которая удерживается на трубчатой оси колеса V, совершает один оборот по циферблату за двенадцать часов.

Нашей целью здесь не было давать подробный отчет о часах и их работе - предмете, по которому мы должны отсылать читателя к соответствующему разделу этой работы. Была предпринята попытка такого общего описания только для того, чтобы объяснить, как работа зубьев и шестерен может быть применена для регулирования движения.



Х. Адлард, Шотландия

Лондон, издательство Longman & Co.

ГЛАВА XV.

ШКИВА.

(267.) ТНЕ Следующий класс простых машин, который представляется нашему вниманию, - это тот, который мы называли *шнуром*. Если бы веревка была совершенно гибкой и ее можно было перегибать через острый край и двигаться по ней без трения, мы были бы способны с ее помощью заставить силу в любом одном направлении преодолевать сопротивление или сообщать движение в любом другом направлении. Таким образом, если P , [рис. 112](#), является таким краем, то совершенно гибкая веревка, проходящая по нему, была бы способна передавать силу Sf на сопротивление Qr , чтобы поддерживать или преодолевать R , или движением в направлении Sf производить другое движение в направлении R Q . Но поскольку никакие материалы, из которых могут быть изготовлены канаты, не могут придать им идеальной гибкости, и поскольку пропорционально прочности, с помощью которой они способны передавать усилие, увеличивается их жесткость, на практике необходимо принять средства для устранения или смягчения тех эффектов, которые сопровождают недостаточную гибкость, и которые в противном случае сделали бы канаты практически непригодными в качестве машин.

Когда шнур используется для передачи усилия из одного направления в другое, его жесткость создает некоторое усилие, необходимое для изгиба его на угол P , который образуют два направления; и если угол острый, приложение такого усилия может сопровождаться разрывом шнура. Если бы вместо изгиба веревки в одной точке на один угол изменение направления производилось путем последовательного отклонения ее на несколько углов, каждый из которых был бы менее острым, чем мог бы быть один, сила, необходимая для отклонения, а также вероятность разрыва веревки, были бы значительно уменьшены. Но эта цель будет достигнута еще совершеннее, если изгиб шнура будет производиться путем сгибания его по кривой поверхности.

Если бы веревка использовалась только для поддержания, а не для перемещения груза, этого было бы достаточно, чтобы устранить неудобства, возникающие из-за ее жесткости. Но когда требуется создать движение, веревка, проходя по изогнутой поверхности, будет подвергаться чрезмерному трению и, следовательно, быстрому износу. Это неудобство устраняется за счет того, что поверхность, по которой проходит канат, перемещается вместе с ним, так что создается не большее трение, чем возникло бы при катании изогнутой поверхности по канату.

(268.) Все эти цели достигаются с помощью общего шкива, который состоит из колеса, называемого *шкивом*, закрепленного в блоке и вращающегося на оси. На краю колеса образована канавка, по которой проходит канат, и колесо вращается вместе с ним. Такое устройство представлено на [рис. 113](#).

Мы пока опустим рассмотрение той части эффектов жесткости и трения машины, которая не устраняется только что объясненным устройством, и будем рассматривать канат как совершенно гибкий и движущийся без трения.

Из определения гибкого шнура следует, что его натяжение, или сила, с которой он растягивается по всей длине, должно быть равномерным. Из этого принципа, и только из него, могут быть выведены все механические свойства шкивов.

Хотя, как уже объяснялось, вся механическая эффективность этой машины зависит от свойств шнура, а не от свойств блока и шкива, которые вводятся только для устранения случайных эффектов жесткости и трения; тем не менее, блоку и шкиву было принято давать название шкив, а комбинация блоков, шкивов и канатов называется *снастью*.

(269.) Когда трос проходит через единственное колесо, которое зафиксировано в своем положении, как показано на [рис. 113.](#), машина называется *неподвижным шкивом*. Поскольку натяжение шнура равномерно по всей его длине, из этого следует, что в этой машине мощность и вес равны. Поскольку груз растягивает ту часть шнура, которая находится между грузом и шкивом, а сила растягивает ту часть между грузом и шкивом. А поскольку натяжение по всей длине одинаковое, вес должен быть равен мощности.

Следовательно, кажется, что эта машина не обладает никакими механическими преимуществами. Тем не менее, вряд ли существует какой-либо двигатель, простой или сложный, обеспечивающий большее удобство. При применении силы, будь то сила людей или животных, или возникающая из природных сил, всегда есть некоторые направления, в которых она может быть применена с гораздо большим удобством и пользой, чем в других, и во многих случаях применение этих сил ограничено одним направлением. Таким образом, машина, которая позволяет нам придать движущей силе наиболее выгодное направление, каким бы ни было направление противодействующего ей сопротивления, обеспечивает такое же практическое удобство, как и машина, позволяющая небольшой мощности уравновешивать или преодолевать большой вес. При направлении усилия против сопротивления часто бывает необходимо использовать два неподвижных шкива. Таким образом, при подъеме груза А, [рис. 114.](#), на вершину здания, с помощью силы лошади, движущейся вниз, могут использоваться два неподвижных блока В и С. Веревку протягивают от А через блок В; и, проходя вниз, подводят под С, и, наконец, животное тянет ее в горизонтальной плоскости. Таким же образом распускаются паруса и поднимаются флаги на реях и мачтах корабля, когда матросы тянут за веревку на палубе.

С помощью закрепленного блока человек может подняться на значительную высоту или спуститься на любую предполагаемую глубину. Если его посадить на стул или ведро, прикрепленное к одному концу веревки, которая перекинута через неподвижный блок, взявшись за эту веревку с другой стороны, как показано на [рис. 115.](#), он может по желанию спуститься на глубину, равную половине всей длины веревки, постоянно натягивая веревку с одной стороны и прижимая ведро или стул своим весом с другой. Пожарные лестницы были сконструированы по этому принципу, причем неподвижный блок крепился к какой-либо части здания.

(270.) *Одиночный подвижный шкив* представлен на [рис. 116.](#) Шнур протягивается из фиксированной точки F и, проходя через блок В, прикрепленный к грузу W, проходит над

неподвижным шкивом С, мощность которого прикладывается к Р. Сначала предположим, что части шнура с каждой стороны колеса В параллельны; в этом случае весь вес W поддерживается частями шнуров Vc и Vf , и эти части одинаково натянуты ([268.](#)), каждая должна выдерживать половину веса, который, следовательно, является натяжением шнура. Этому натяжению сопротивляется мощность в точке Р, которая, следовательно, должна быть равна половине веса. Следовательно, в этой машине вес в два раза превышает мощность.

(271.) Если части шнура Vc и Vf не параллельны, как показано на [рис. 117.](#), следовательно, для его поддержания необходима мощность, превышающая половину веса. Чтобы определить силу, необходимую для поддержания данного веса, в данном случае проведите линию Ва в вертикальном направлении, состоящую из столько дюймов, сколько вес состоит из унций; от А проведите D параллельно Vc , а Ae параллельно Vf ; сила веса, представленная буквой В, будет эквивалентна двум силам, представленным буквами Bd и В E. ([74.](#)) Количество дюймов в этих строках соответственно будет представлять количество унций, что эквивалентно натяжению частей Vf и Vc шнура. Но поскольку эти напряжения равны, Bd и Ве должны быть равны, и каждое из них будет выражать величину мощности Р, которая растягивает шнур при Р С.

Очевидно, что четыре прямые, А Е, Е В, В D и Da, равны. И поскольку каждый из них представляет собой мощность, вес, который представлен А В, должен быть менее чем в два раза больше мощности, которая представлена А Е и Е В, взятыми вместе. Отсюда следует, что по мере того, как части канатов, поддерживающих груз, отклоняются от параллельности, машина становится все менее и менее эффективной; и существуют определенные наклоны, при которых уравнивающая сила была бы намного больше веса.

(272.) Механическая мощность шкивов допускает почти неограниченное увеличение при комбинировании. Системы шкивов можно разделить на два класса: те, в которых используется один трос, и те, которые состоят из нескольких отдельных тросов. [На рис. 118.](#) и [119.](#) представлены две системы шкивов, каждая из которых имеет один трос. Груз в каждом случае прикреплен к подвижному блоку В, в котором закреплены два или более колеса; А представляет собой неподвижный блок, и веревка последовательно пропускается через колеса вверху и внизу и, после прохождения через последнее колесо вверху, прикрепляется к приводу. Натяжение той части шнура, к которой подключено питание, производится источником питания и, следовательно, эквивалентно ему, и такое же натяжение должно распространяться по всей его длине. Вес поддерживается всеми теми частями шнура, которые проходят от нижнего блока, и поскольку сила, которая их растягивает, одинакова, а именно. что касается мощности, то влияние веса должно быть равномерно распределено между ними, предполагается, что их направления параллельны. Из этого рассуждения будет очевидно, что вес будет во столько же раз превышать мощность, сколько и количество шнуров, поддерживающих нижний блок. Таким образом, если будет шесть шнуров, то каждый шнур будет выдерживать шестую часть веса, то есть вес будет в шесть раз превышать натяжение шнура или в шесть раз превышать мощность. [На рис. 118.](#) шнур показан окончательно прикрепленным к крюку на верхнем блоке. Но его можно перекинуть через дополнительное колесо, закрепленное в этом блоке, и, наконец, прикрепить к крюку в нижнем блоке, как показано на [рис. 119.](#), с помощью которого

мощность машины увеличится на единицу, а количество шнуров в нижнем блоке увеличится на единицу. В системе, представленной на [рис. 118](#), колеса размещены в блоках одно над другим; на [рис. 119](#) они расположены рядом. Во всех системах шкивов этого класса вес нижнего блока должен рассматриваться как часть поднимаемого веса, и при оценке мощности машины на это всегда следует обращать внимание.

(273.) Когда мощность машины и, следовательно, количество колес значительны, возникает некоторая сложность в расположении колес и шнуров. Знаменитый Смитон изобрел снасть, получившую свое название в его честь, в которой в каждом блоке по десять колес: пять больших колес расположены бок о бок, а пять меньших аналогичным образом расположены над ними в нижнем блоке и под ними в верхнем. [На рис. 120](#) изображены блоки Смитона без веревки. Колеса помечены цифрами 1, 2, 3 и т.д. в том порядке, в котором через них должна быть пропущена веревка. Поскольку в этом шкиве 20 отдельных частей троса поддерживают нижний блок, вес, включая нижний блок, будет в 20 раз превышать уравнивающую силу.

(274.) Во всех этих системах шкивов каждое колесо имеет отдельную ось, и для каждого оборота троса в каждом блоке имеется отдельное колесо. Каждое колесо испытывает трение на своей оси, а также между шкивом и блоком. Таким образом, машина теряет значительную часть своей эффективности, поскольку для преодоления одного только трения в большинстве случаев необходима значительная мощность.

Было предложено остроумное изобретение, с помощью которого все преимущества большого количества колес могут быть получены без многократного трения отдельных шкивов и осей. Чтобы оценить совершенство этого устройства, необходимо будет рассмотреть скорость, с которой трос проходит по нескольким колесам такой системы, как показано на [рис. 118](#). Если один фут каната Gf проходит через шкив F , два фута должны проходить через шкив E , поскольку расстояние между F и E сокращается на один фут, общая длина каната Gfe должна быть сокращена на два фута. Эти два фута веревки должны проходить в направлении Ed , и колесо D , поднимаясь на один фут, следовательно, должно пропускать через себя три фута веревки. Эти три фута веревки проходят в направлении Dc , и поскольку веревка Dc также укорачивается на один фут при подъеме нижнего блока, четыре фута веревки должны проходить над колесом C . Таким же образом можно показать, что пять футов должно проходить над B и шесть футов над A . Таким образом, каким бы ни было количество колес в верхнем и нижнем блоках, части веревки, которые проходят за одно и то же время через колеса в нижнем блоке, соответствуют нечетным числам 1, 3, 5 и т. д.; а те, которые проходят через колеса в верхнем блоке за то же время, соответствуют четным числам 2, 4, 6 и т. д. Если бы все колеса были одинакового размера, как на [рис. 119](#), они вращались бы со скоростью, пропорциональной скорости, с которой по ним проходит веревка. Таким образом, в то время как первое колесо внизу вращается один раз, первое колесо вверху будет вращаться дважды; второе колесо внизу - три раза; второе колесо вверху - четыре раза и так далее. Если бы, однако, колеса различались по размеру пропорционально количеству веревки, которая должна быть перекинута через них, они, очевидно, вращались бы в одно и то же время. Таким образом, если бы первое колесо вверху было в два раза больше первого колеса внизу, за один оборот было бы сброшено вдвое большее количество веревки. Опять же, если бы второе колесо внизу было в три раза больше первого колеса внизу, оно сбросило бы за один оборот в три раза больше веревки, и

так далее. Колеса, имеющие такие пропорции, вращающиеся точно в одно и то же время, могли бы быть размещены на одной оси и совершали бы одно общее движение, или, что приводит к тому же результату, на поверхности одного сплошного колеса можно было бы вырезать несколько канавок диаметром, соответствующим нечетным числам 1, 3 и 5 и т. Д., Для нижнего шкива, и соответствующие канавки на поверхности другого сплошного колеса, представленные четными числами 2, 4, 6 и т. Д., Для верхнего шкива. Веревка, последовательно пропущенная через канавки таких колес, сбрасывалась бы точно таким же образом, как если бы каждая канавка была на отдельном колесе, и каждое колесо вращалось независимо от других. Таков шкив Уайта, представленный на [рис. 121](#).

Преимущество этой машины при точной конструкции очень велико. Трение, даже когда приходится противодействовать большому сопротивлению, очень незначительно; но, с другой стороны, оно имеет соответствующие недостатки, которые сильно ограничивают его практическую полезность. При изготовлении канавок большая трудность заключается в том, чтобы придать им точные пропорции. При этом должна быть точно рассчитана толщина каната; и, следовательно, из этого следует, что один и тот же шкив никогда не может действовать иначе, как с канатом определенного диаметра. Очень небольшое отклонение от истинного соотношения канавок приведет к неравномерному натягиванию веревки и придаст некоторым ее участкам чрезмерную долю веса, в то время как другие части станут почти, а иногда и вовсе провисать. Помимо этих дефектов, канат настолько подвержен повреждению при выпадении из пазов, что шкив вряд ли можно считать переносным.

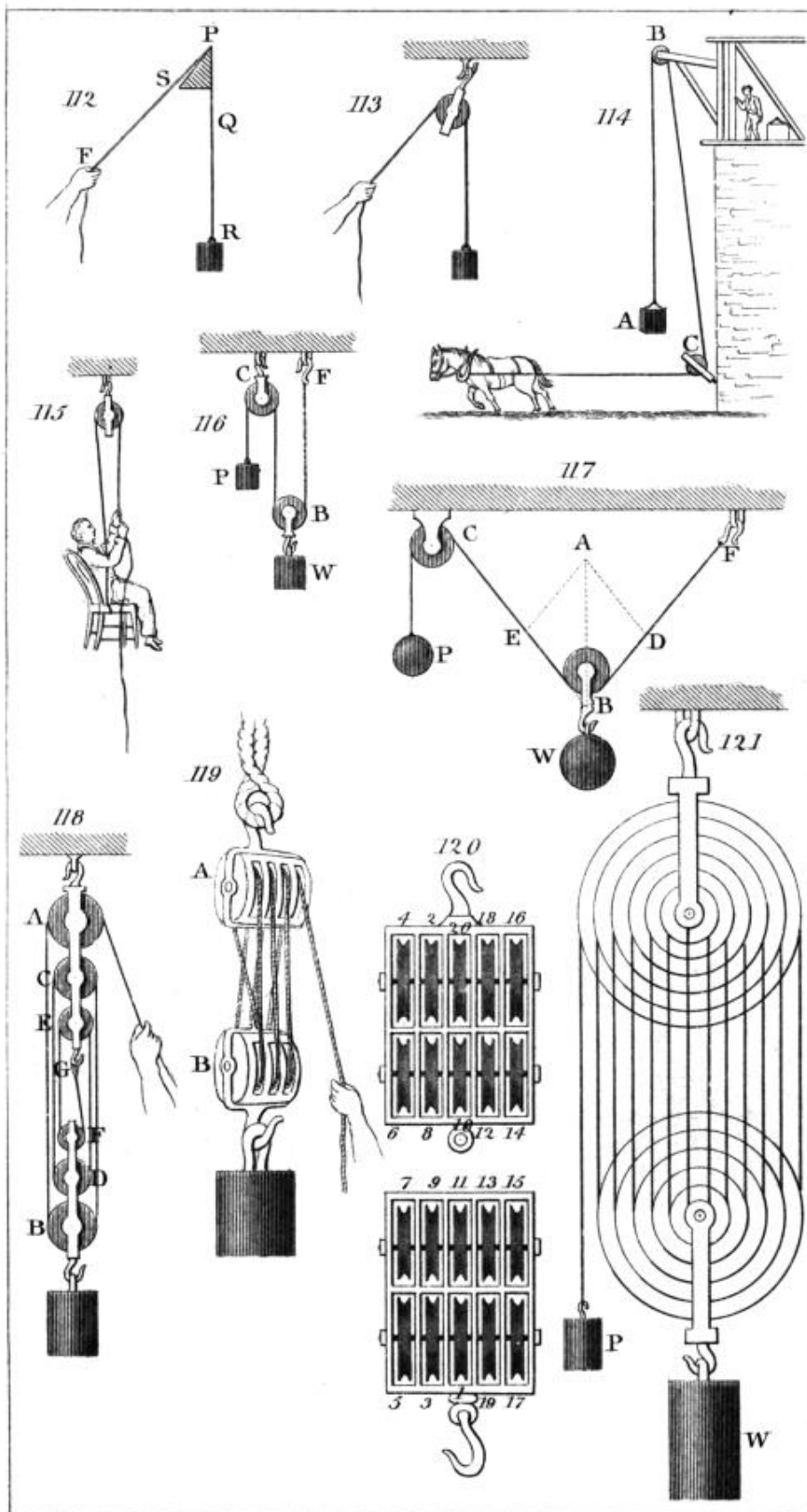
По этим и другим причинам эта машина, какой бы гениальной она, несомненно, ни была, никогда широко не использовалась.

(275.) В нескольких только что описанных системах шкивов крюк, к которому прикреплен неподвижный блок, полностью поддерживает как мощность, так и вес. Когда машина находится в равновесии, мощность поддерживает только ту часть веса, которая равна натяжению шнура, весь остальной вес приходится на неподвижную точку, согласно тому, что наблюдалось в ([225](#).)

Если мощность переместить так, чтобы поднять груз, он будет двигаться со скоростью, во столько раз превышающей скорость груза, насколько сам вес больше мощности. Таким образом, на [рис. 118](#) если груз, прикрепленный к нижнему блоку, поднимется на один фут, через блок А пройдет шесть футов лески, согласно тому, что уже было доказано. Таким образом, мощность снизится на шесть футов, в то время как вес поднимется на один фут. Но в этом случае вес в шесть раз превышает мощность. Следовательно, все наблюдения в ([226](#).) будут применимы к случаям больших грузов, поднимаемых малыми силами с помощью только что описанной системы шкивов.

(276.) При использовании двух или более канатов шкивы могут комбинироваться различными способами для получения любой степени механического воздействия. Если бы к любой из уже описанных систем был добавлен один подвижный шкив, мощность машины была бы удвоена. В этом случае вторая веревка прикрепляется к крюку нижнего блока, как показано на [рис. 122](#), и, пропускаемая через подвижный шкив, прикрепленный к грузу, она, наконец, доводится до фиксированной точки. Натяжение второго шнура равно половине веса ([270](#)); и поэтому мощность Р с помощью первого шнура будет иметь только половину

натяжения, которое она имела бы, если бы груз был прикреплен к нижнему блоку. Применяемый таким образом подвижный шкив называется *бегунком*.



(277.) Две системы шкивов, называемых *испанскими бартонами*, каждый из которых имеет по два троса, представлены на [рис. 123](#). Натяжение каната Ра Вс в первой системе равно мощности; и, следовательно, части Ва и Вс поддерживают часть веса, равную удвоенной мощности. Веревка Еа поддерживает натяжение А Р и А В; и, следовательно, натяжение А Ед в два раза сильнее. Таким образом, суммарное натяжение канатов, поддерживающих шкив В, в четыре раза превышает мощность, которая, следовательно, равна величине веса. Во второй системе канат Р А D растягивается за счет силы. Веревка А Е В С действует против объединенных натяжений А Р и А D; и поэтому натяжение А Е или Е В в два раза сильнее. Таким образом, вес действует против трех напряжений, два из которых равны удвоенной мощности, а оставшееся равно мощности. Таким образом, вес в пять раз превышает мощность.

Один канат может быть соединен с одним подвижным шкивом таким образом, чтобы выдерживать вес, в три раза превышающий мощность. На [рис. 124](#) представлена эта схема, где цифры в достаточной степени указывают на натяжение веревки, а также соотношение веса и мощности. На [рис. 125](#) представлен другой способ получения того же эффекта с помощью двух веревок.

(278.) Если последовательно изготовить несколько отдельных подвижных шкивов, воздействующих друг на друга, эффект удваивается с помощью каждого дополнительного шкива: такая система представлена на [рис. 126](#). Натяжение первой веревки равно мощности; вторая веревка действует против удвоенного натяжения первой, и поэтому она натягивается с силой, равной удвоенной мощности; третья веревка действует против удвоенного натяжения, и поэтому она натягивается с силой, равной четырехкратной мощности, и так далее. В системе, представленной на [рис. 126](#), имеется три веревки, а вес в восемь раз превышает мощность. Другая веревка увеличила бы его мощность в шестнадцать раз, и так далее.

Очевидно, что в этой системе канаты должны обладать разной степенью прочности, поскольку натяжение, которому они подвергаются, увеличивается в двойной пропорции от силы к весу.

(279.) Если каждый из канатов вместо того, чтобы прикрепляться к неподвижным точкам наверху, провести по неподвижным шкивам и прикрепить соответственно к нескольким подвижным шкивам, как показано на [рис. 127](#), мощность машины будет значительно увеличена; ибо в этом случае силы, растягивающие последовательные канаты, увеличиваются в тройной, а не двойной пропорции, что будет очевидно, если обратить внимание на цифры, выражающие натяжения на рисунке. Одна веревка увеличила бы вес в три раза, две веревки - в девять раз, три веревки - в двадцать семь раз и так далее. Расположение шкивов представлено на [рис. 128](#), с помощью которого каждый трос, вместо того чтобы окончательно прикрепляться к неподвижной точке, как на [рис. 126](#), прикрепляется к грузу. Вес в этом случае поддерживается тремя канатами; один натягивается с силой, равной мощности; другой - с силой, равной удвоенной мощности; и третий - с силой, равной четырехкратной мощности. Таким образом, в данном случае вес в семь раз превышает мощность.

(280.) Если канаты вместо того, чтобы прикрепляться к грузу, проходят через колеса, как показано на [рис. 129](#), и, наконец, прикрепляются к шкивам выше, мощность машины значительно увеличивается. В представленной здесь системе вес в двадцать шесть раз больше мощности.

(281.) Рассматривая эти несколько комбинаций шкивов, мы не стали оценивать влияние веса шкивов и блоков. Не вдаваясь в подробности этого вычисления, в целом можно заметить, что в системах, представленных на [фиг. 126](#), 127. вес колеса и блоков противодействует мощности; но это на [фиг. 128](#) и 129. они помогают силам поддерживать вес. В системах, представленных на [рис. 123](#). вес шкивов в определенной степени нейтрализует друг друга.

(282.) Во всех случаях будет обнаружено, что величина, на которую вес превышает мощность, поддерживается неподвижными точками; и поэтому, хотя обычно утверждается, что малая мощность поддерживает большой вес, все же в шкиве, как и во всех других машинах, мощность поддерживает вес не больше, чем в точности равна ее собственной величине. Нет необходимости доказывать это на каждом из приведенных примеров: объяснив это в одном случае, учащийся без труда применит те же рассуждения к другим. На [рис. 126](#). неподвижный шкив выдерживает усилие, равное удвоенной мощности, и с его помощью сила, дающая натяжение первому канату, выдерживает часть веса, равную ему самому. Первый крючок выдерживает часть веса, равную натяжению первой струны, или силе натяжения. Второй крюк выдерживает усилие, равное удвоенной мощности, а третий крюк выдерживает усилие, равное четырехкратной мощности. Следовательно, три крючка выдерживают часть веса, равную семикратной мощности; а поскольку сам вес в восемь раз превышает мощность, очевидно, что часть веса, которая остается поддерживаться силой, равна самой мощности.

(283.) Когда груз поднимается с помощью любой из систем шкивов, которые были описаны последним, всегда будет соблюдаться соотношение между скоростью перемещения груза и скоростью передачи мощности, которое так часто наблюдается в других машинах. В системе шкивов, представленной на [рис. 126](#), при весе, в восемь раз превышающем мощность, скорость передачи мощности будет в восемь раз больше скорости передачи веса. Если мощность будет передана на восемь футов, то та часть троса, которая находится между неподвижным шкивом и первым подвижным шкивом, будет укорочена на восемь футов. И поскольку две части, которые лежат над первым подвижным шкивом, должны быть одинаково укорочены, каждая уменьшится на четыре фута; следовательно, первый шкив поднимется на четыре фута, в то время как мощность переместится на восемь футов. Таким же образом можно показать, что в то время как первый блок перемещается на четыре фута, второй перемещается на два; и в то время как второй перемещается на два, третий, к которому прикреплен груз, поднимается на один фут. Таким образом, в то время как мощность передается на восемь футов, вес перемещается на один фут.

Рассуждая подобным образом, можно показать, что пространство, через которое перемещается сила, в каждом случае во столько раз превышает высоту, на которую поднимается вес, насколько вес больше силы.

(284.) Благодаря своей портативной форме, дешевизне конструкции и простоте, с которой его можно применять практически в любой ситуации, шкив является одной из самых полезных простых машин. Однако механическое преимущество, которым он, по-видимому,

обладает в теории, на практике значительно уменьшается из-за жесткости канатов и трения колес и блоков. Таким образом, подсчитано, что в большинстве случаев теряется до двух третей мощности. Шкив широко используется в строительстве, где приходится поднимать грузы на большую высоту. Но наиболее широкое применение он находит в такелаже судов, где почти каждое движение совершается с его помощью.

(285.) Во всех примерах шкивов мы предположили, что части троса, поддерживающие вес, и каждый из подвижных шкивов параллельны друг другу. Если они имеют значительный наклон, относительное натяжение различных канатов должно оцениваться в соответствии с принципом, применяемым в ([271](#).)

ГЛАВА XVI.

НА НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ, КЛИНЕ И ВИНТЕ.

(286.) Тне Наклонный рубанок - самая простая из всех машин. Это твердая плоская поверхность, образующая некоторый угол с горизонтальной плоскостью, причем этот угол не является прямым. Когда груз помещается на такую плоскость, создается двойной эффект. Часть воздействия веса преодолевается плоскостью и оказывает на нее давление; а остальная часть толкает вес вниз по плоскости и будет оказывать давление на любую поверхность, сопротивляющуюся его движению, расположенную в направлении, перпендикулярном плоскости ([131.](#))

Пусть $A B$, [рис. 130.](#) будет такой плоскостью, $B C$ ее горизонтальным основанием, $A C$ ее высотой и $A B C$ ее углом возвышения. Пусть W - вес, наложенный на него. Этот вес действует в вертикальном направлении $W d$ и эквивалентен двум силам: $W f$, перпендикулярной плоскости, и $W e$, направленной вниз по плоскости ([74.](#)) Если плоскость расположить под прямым углом к наклонной плоскости ниже W , она будет сопротивляться опусканию груза и выдерживать давление, выраженное через $W E$. Таким образом, груз W , опирающийся в углу, вместо создания одного давления в направлении $W d$, будет создавать два давления, одно из которых выражается через $W f$ на наклонную плоскость, а другое, выраженное через $W e$, - на сопротивляющуюся плоскость. Эти давления, соответственно, имеют такое же отношение ко всему весу, как $W f$ и $W e$ должны относиться к $W d$, или как $D e$ и $W e$ должны относиться к $W d$, поскольку $D e$ равно $W f$. Итак, треугольник $W E D$ во всех отношениях подобен треугольнику $A B C$, причем один отличается от другого только масштабом, в котором он построен. Следовательно, три линии $A C$, $C b$ и $B a$ находятся в той же пропорции друг к другу, что и линии $W E$, $E D$ и $W D$. Следовательно, отношение $A B$ к $A C$ такое же, как отношение всего веса к давлению, направленному в сторону B , а отношение $A B$ к $B c$ такое же, как отношение всего веса к давлению на наклонную плоскость.

Здесь мы предположили, что вес удерживается на наклонной плоскости твердой плоскостью, установленной под прямым углом к ней. Но сила, необходимая для поддержания веса, будет одинаковой, каким бы способом она ни применялась, при условии, что она действует в направлении плоскости. Таким образом, к грузу может быть прикреплен шнур и протянут в направлении A , или руки человека могут быть приложены к грузу под ним, чтобы противостоять его опусканию в направлении B . Но каким бы способом это ни было применено, величина мощности будет определяться одним и тем же способом. Предположим, что вес состоит из стольких фунтов, сколько есть дюймов в $A B$, тогда мощность, необходимая для поддержания его на плоскости, будет состоять из стольких фунтов, сколько есть дюймов в $A C$, а давление на плоскость составит столько фунтов, сколько есть дюймов в $B C$.

Из сказанного можно легко сделать вывод, что чем меньше высота самолета, тем меньше будет мощность, необходимая для поддержания на нем данного веса, и тем больше будет

давление на него. Предположим, что наклонная плоскость Ab поворачивается на шарнире в точке B и нажимается так, что угол ее подъема уменьшается, очевидно, что по мере уменьшения этого угла высота плоскости уменьшается, а ее основание увеличивается. Таким образом, когда он принимает положение $B A'$, высота $A' C'$ меньше прежней высоты $A C$, в то время как основание $B C'$ больше прежнего основания $B C$. Мощность, необходимая для удержания веса на плоскости в положении Ba' , представлена через $A'C'$ и настолько же меньше мощности, необходимой для удержания его на плоскости Ab , насколько высота $A'C'$ меньше высоты $A C$. С другой стороны, давление на плоскость в положении Ba' настолько же больше давления на плоскость Ba , насколько основание Bc' больше основания $B C$.

(287.) Таким образом, мощность наклонной плоскости, рассматриваемой как машина, оценивается соотношением ее длины к высоте. Эта мощность всегда увеличивается за счет уменьшения высоты самолета.

Неровные дороги могут рассматриваться как наклонные плоскости, и нагрузки, перемещаемые по ним тележками, рассматриваемые с точки зрения приводящих их в движение сил, подчиняются всем условиям, которые были установлены для наклонных плоскостей. Уклон дороги оценивается по высоте, соответствующей некоторой предполагаемой длине. Таким образом, говорят, что дорога поднимается на один фут из пятнадцати, на один фут из двадцати и т. д., Что означает, что если принять пятнадцать или двадцать футов дороги за длину наклонной плоскости, такой как $A B$, соответствующая высота будет равна одному футу. Или то же самое можно выразить так: если отмерить на дороге пятнадцать или двадцать футов, то разница уровней двух концов измеренного расстояния составит один фут. Согласно этому методу оценки наклона дорог, мощность, необходимая для поддержания нагрузки на них (без учета эффекта трения), всегда пропорциональна этой высоте. Таким образом, если дорога поднимается на один фут из двадцати, мощности в одну тонну будет достаточно, чтобы выдержать двадцать тонн, и так далее.

В горизонтальной плоскости единственное сопротивление, которое должна преодолевать сила, - это трение груза о плоскость, и поскольку рассмотрение этого пока опущено, груз, однажды приведенный в движение, будет продолжать двигаться вечно, без какого-либо дальнейшего действия силы. Но если плоскость наклонена, то мощность будет затрачена на поднятие груза на перпендикулярную высоту плоскости. Таким образом, на дороге, которая поднимается на один фут из десяти, мощность затрачивается на поднятие груза на один перпендикулярный фут на каждые десять футов дороги, по которой он перемещается. Поскольку расход энергии зависит от скорости, с которой груз поднимается перпендикулярно, очевидно, что чем больше наклон дороги, тем медленнее должно быть движение с той же силой. Если энергия двигателя такова, что позволяет поднимать груз со скоростью один фут в минуту, то груз можно перемещать каждую минуту по той длине дороги, которая соответствует подъему на один фут. Таким образом, если две дороги поднимаются, одна со скоростью фут на пятнадцать футов, а другая со скоростью один фут на двадцать футов, то при одинаковой затрате энергии вес переместится на пятнадцать футов одной и на двадцать футов другой с той же скоростью.

Исходя из таких соображений, как эти, легко может показаться, что часто бывает целесообразнее проложить дорогу кружным путем, чем продолжать ее самым прямым

курсом; ибо, хотя измеренная длина дороги может быть значительно больше, чем в первом случае, все же при тех же затратах энергии можно увеличить скорость больше, чем теряется при увеличении расстояния. Учитывая эти обстоятельства, современные дорожники значительно облегчили и ускорили сообщение между отдаленными местами.

(288.) Если сила действует наклонно к плоскости, это будет иметь двойной эффект: часть будет расходоваться на поддержание или притягивание веса, а часть - на уменьшение или увеличение давления на плоскость. Пусть W Р, [рис. 130](#), будет степенью. Это будет эквивалентно двум силам, W_f , перпендикулярным плоскости, и W_e в направлении плоскости. (74.) Для того, чтобы мощность поддерживала вес, необходимо, чтобы та часть W_e мощности, которая действует в направлении плоскости, была равна той части W_e , [рис. 130](#), которая действует вниз по плоскости. Другая часть W_f мощности, действующей перпендикулярно плоскости, непосредственно противоположна той части W_f веса, которая создает давление. Следовательно, давление на плоскость уменьшится на величину W_f . Величина мощности, которая будет уравниваться весом, в этом случае может быть найдена следующим образом. Возьмем W Е' равным W Е и проведем Е' Р перпендикулярно плоскости и в направлении силы. Отношение мощности к весу будет равно отношению W Р к W D. И отношение давления к весу будет равняться разнице между W_f и W_f к W D. Если величина мощности имеет меньшее отношение к весу, чем W_p к W_d , это не будет поддерживать тело в плоскости, но позволит ему опускаться. И если он будет иметь большую пропорцию, это приведет к перемещению веса вверх по плоскости в направлении А.

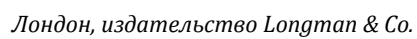
(289.) Иногда случается, что груз, расположенный на одной наклонной плоскости, поднимается или поддерживается другим грузом, расположенным на другой наклонной плоскости. Таким образом, если А В и А В', [рис. 131](#), представляют собой две наклонные плоскости, образующие угол в точке А, а W W' - два груза, размещенных на этих плоскостях и соединенных шнуром, проходящим через блок в точке А, то один груз либо поддержит другой, либо один опустится, подтягивая другой вверх. Чтобы определить обстоятельства, при которых возникнут эти эффекты, проведите линии W_d и $W' D'$ в вертикальном направлении и отберите от них столько дюймов, сколько унций содержится в грузиках соответственно. W_d и $W' D'$ являются взятыми таким образом длинами и, следовательно, представляют веса, линии W_e и $W' E'$ будут представлять влияние этих весов соответственно вниз по плоскостям. Если W_e и $W' E'$ равны, веса будут поддерживать друг друга без движения. Но если W_e будет больше, чем $W' E'$, вес W опустится, увлекая вес W' вверх. И если $W' E'$ будет больше, чем W_e , вес W' опустится, подтягивая вес W вверх. В каждом случае линии W_f и $W' F'$ будут представлять давления на плоскости соответственно.

Для только что описанного эффекта нет необходимости в том, чтобы наклонные плоскости, как показано на рисунке, образовывали угол друг с другом. Они могут располагаться параллельно или в любом другом положении, при этом трос перекидывается через достаточное количество колес, установленных таким образом, чтобы придать ему необходимый прогиб. Этот метод перемещения грузов часто применяется на крупных общественных работах, где используются железные дороги. Грузовые повозки спускаются по одной наклонной плоскости, в то время как другие повозки, либо пустые, либо загруженные настолько, чтобы позволять спускать те, с которыми они соединены, поднимаются по другой.

(290.) При применении наклонной плоскости, на которую мы до сих пор обращали внимание, предполагается, что сама машина зафиксирована в своем положении, в то время как груз перемещается по ней. Но часто случается, что приходится преодолевать сопротивление, которое не допускает такого перемещения. В таких случаях вместо перемещения груза по плоскостям плоскость должна перемещаться под грузом или против него. Пусть D_e , [рис. 132.](#), представляет собой тяжелую балку, закрепленную в вертикальном положении между направляющими F_g и H_i , так что она может свободно перемещаться вверх и вниз, но не вбок. Пусть $A B C$ - наклонная плоскость, крайняя точка которой расположена под концом балки. Сила, приложенная к задней части этой плоскости A_c в направлении C_b , подтолкнет плоскость под балкой, чтобы поднять балку в положение, представленное на [рис. 133.](#) Таким образом, в то время как наклонная плоскость перемещается на расстояние C_b , балка поднимается на высоту C_a .

(291.) Когда наклонная плоскость наносится таким образом, это называется *клином*. И если бы сила, приложенная к спине, была постоянным давлением, ее соотношение к весу было бы равно соотношению C к $C B$. Отсюда следует, что чем острее угол B , тем мощнее будет клин.

В некоторых случаях клин формируется из двух наклонных плоскостей, расположенных основанием к основанию, как показано на [рис. 134.](#) Теоретическая оценка мощности этой машины неприменима на практике с какой-либо степенью точности. Отчасти это объясняется огромной долей трения в большинстве случаев в теоретической величине мощности, но еще в большей степени природой обычно используемой мощности. Сила удара по своей природе настолько сильно отличается от постоянных сил, таких как давление грузов или сопротивление, оказываемое сцеплением тел, что она не допускает численного сравнения с ними. Следовательно, мы не можем должным образом определить соотношение силы удара с величиной веса или сопротивления. Клин почти неизменно вдавливается ударом; в то время как сопротивления, которые ему приходится преодолевать, столь же постоянно являются силами другого рода. Хотя, однако, точного численного сравнения провести невозможно, все же в общих чертах можно констатировать, что клин становится все более и более мощным по мере того, как его угол становится более острым.



В искусстве и на производстве клинья используются там, где требуется приложить огромное усилие на очень маленьком пространстве. Таким образом, к ним прибегают для раскалывания массивов древесины или камня. Корабли поднимаются в доках с помощью клиньев, вбиваемых под их кили. Клинь является основным действующим лицом на маслобойне. Семена, из которых будет извлечено масло, помещают в мешочки для волос и помещают между плоскостями из твердой древесины. Клинья, вставленные между мешками, приводятся в движение за счет падения на них тяжелых балок. Создаваемое таким образом давление настолько велико, что семена в мешочках образуют массу, почти такую же твердую, как древесина. Имели место случаи, когда клин использовался для восстановления пошатнувшегося здания в его перпендикулярном положении.

Все режущие и колющие инструменты, такие как ножи, бритвы, ножницы, стамески и т.п., гвозди, булавки, иглы, шила и т.п., являются клиньями. Угол наклона клина в этих случаях более или менее острый, в зависимости от цели, для которой он должен быть применен. При определении этого следует учитывать две вещи — механическую мощность, которая увеличивается за счет уменьшения угла наклона клина; и прочность инструмента, которая всегда уменьшается по одной и той же причине. Следовательно, существует практический предел увеличения мощности, и инструменту должна быть придана только та степень остроты, которая соответствует прочности, необходимой для цели, для которой он должен применяться. В инструментах, предназначенных для резки дерева, угол обычно составляет около 30 °. Для железа он составляет от 50 ° до 60 °, а для латуни - от 80 ° до 90°. Инструменты, которые действуют давлением, могут быть сделаны более острыми, чем те, которые приводятся в действие ударом; и в целом, чем мягче и податливее разделяемое вещество и чем меньше сила, необходимая для воздействия на него, тем более острым может быть изготовлен клин.

Во многих случаях полезность клина зависит от того, что полностью опущено в его теории, а именно. трение, возникающее между его поверхностью и веществом, которое он разделяет. Это тот случай, когда для скрепления частей конструкций вместе используются штифты, болты или гвозди; в этом случае, если бы не трение, они бы сдвинулись со своих мест и не смогли бы произвести желаемого эффекта. Даже когда клин используется в качестве механического двигателя, наличие трения абсолютно необходимо для его практического использования. Усилие, как уже было указано, обычно действует путем последовательных ударов и, следовательно, подвержено постоянным перерывам, и, если бы не трение, клин откатывался бы между интервалами ударов с такой же силой, с какой он был выдвинут вперед. Таким образом, цель труда постоянно подвергалась бы разочарованию. Трение в этом случае используется так же, как и храповое колесо, но гораздо более необходимо, поскольку усилие, прилагаемое к клину, более подвержено перебоям, чем в случаях, когда обычно используются храповые колеса.

(292.) Когда дорога прямо поднимается по склону холма, ее следует рассматривать как наклонную плоскость; но она не потеряет своего механического характера, если вместо прямого подъема к вершине холма она последовательно огибает его и постепенно поднимается так, чтобы после нескольких оборотов достичь вершины. Точно так же можно представить себе дорожку, окружающую столб, с помощью которой можно облегчить подъем по принципу наклонной плоскости. Винтовые лестницы, построенные внутри

огромных колонн, отчасти соответствуют этому характеру; ибо, хотя подъем осуществляется последовательными ступенями, все же, если бы пол можно было сделать достаточно шероховатым, чтобы ноги не скользили, подъем был бы совершен с такой же легкостью. В таком случае извилистая дорожка была бы эквивалентна наклонной плоскости, изогнутой таким образом, чтобы приспособить ее к особым обстоятельствам, в которых потребуются ее использовать. Будет нетрудно проследить сходство между таким приспособлением наклонной плоскости и внешним видом, представляемым резьбой *винта*, и, следовательно, легко понять, что винт - это не что иное, как наклонная плоскость, нанесенная на поверхность цилиндра.

Это, возможно, будет более очевидно из следующего изобретения: пусть AB , [рис. 135](#), представляет собой обычную круглую линейку, а CDE - лист белой бумаги, вырезанный в форме наклонной плоскости, высота которой CD равна длине линейки AB , и пусть край CE бумаги отмечен широкой черной линией: пусть край CD приложен к линейке AB , и, будучи прикрепленным к ней, пусть бумага свернута вокруг линейки; тогда линейка будет иметь вид линейки. винт, [рис. 136](#). резьба винта отмечена черной линией CE , непрерывно наматывающейся на линейку. Пусть Df , [рис. 135](#), равна длине окружности линейки, и нарисуйте Fg параллельно Dc , а Gh параллельно De , часть $Cgfd$ бумаги будет точно окружать линейку один раз: часть Cg будет образовывать один виток нити и может рассматриваться как длина одной наклонной плоскости, окружающей цилиндр, Ch - соответствующая высота, а Gh - основание. Мощность винта действует не параллельно плоскости или резьбе, как в обычных случаях с наклонной плоскостью, а под прямым углом к длине цилиндра Ab , или, что то же самое, параллельно основанию Hg ; следовательно, отношение мощности к весу будет, согласно уже объясненным принципам, таким же, как отношение мощности Ch к пространству, через которое мощность перемещается параллельно Hg за один оборот винта. Hc , очевидно, представляет собой расстояние между последовательными положениями нити, когда она наматывается на цилиндр; и из только что сказанного следует, что чем меньше это расстояние или, другими словами, чем тоньше нить, тем мощнее будет машина.

(293.) При использовании винта вес или сопротивление не накладываются, как в случае с наклонной плоскостью и клином, на поверхность плоскости или резьбы. Мощность обычно передается путем приведения винта в движение в вогнутом цилиндре, на внутренней поверхности которого вырезано спиральное углубление, точно соответствующее резьбе винта, и в котором резьба будет перемещаться за счет непрерывного вращения винта в одном и том же направлении. Этот полый цилиндр обычно называют *гайкой* или *вогнутым винтом*. Винт, окруженный спиральной резьбой, представлен на [рис. 137](#); а участок с таким же зазором в гайке представлен на [рис. 138](#).

Существует несколько способов, которыми воздействие мощности может быть передано на сопротивление с помощью этого устройства.

Сначала предположим, что гайка Ab закреплена. Если винт постоянно вращать вокруг своей оси с помощью рычага Ef , вставленного в один его конец, он будет перемещаться в направлении Cd , продвигаясь при каждом обороте на расстояние, равное расстоянию между двумя смежными резьбами. При повороте рычага в противоположном направлении винт будет перемещен в направлении DC .

Если винт закреплен так, что он не может ни перемещаться в продольном направлении, ни вращаться вокруг своей оси, гайка Ab может быть повернута на винте с помощью рычага и

будет двигаться на винте в направлении С или в направлении D, в зависимости от направления поворота рычага.

В первом случае мы предположили, что гайка абсолютно неподвижна, а во втором случае - что винт абсолютно неподвижен. Однако может случиться так, что гайка, хотя и способна вращаться, не способна перемещаться в продольном направлении; и что винт, хотя и не способен вращаться, способен перемещаться в продольном направлении. В этом случае, поворачивая гайку Ab на винте с помощью рычага, винт будет продвигаться в направлении C D или D C, в зависимости от способа поворота гайки.

Устройство, напротив, может быть устроено так, что гайка, хотя и не способна вращаться, способна перемещаться в продольном направлении; а винт, хотя и способен вращаться, не способен перемещаться в продольном направлении. В этом случае при повороте винта в ту или иную сторону гайка Ab будет прижиматься в направлении C D или D C.

Все эти различные механизмы могут применяться в различных приложениях к машине.

(294.) Винт можно нарезать на цилиндре, поместив цилиндр в токарный станок и придав ему вращательное движение вокруг своей оси. Затем режущую точку подводят к цилиндру и перемещают в направлении ее длины с такой скоростью, чтобы она проходила через расстояние между намеченными нитями, пока цилиндр совершает один оборот. При сохранении относительных перемещений режущей точки и цилиндра с идеальной равномерностью резьба будет обрезана от одного конца до другого. Форма нитей может быть либо квадратной, как на [рис. 137](#), либо треугольной, как на [рис. 139](#).

(295.) Шнек обычно используется в тех случаях, когда необходимо создать сильное давление в небольших пространствах; поэтому он используется в большинстве прессов. На [рис. 140](#) гайка закреплена, и при повороте рычага, который проходит через головку винта, создается давление на любое вещество, помещенное на пластину непосредственно под концом винта. На [рис. 141](#) винт не способен вращаться, но способен продвигаться в направлении своей длины. С другой стороны, гайка способна вращаться, но не продвигается в направлении винта. Когда гайка поворачивается с помощью вставленного в нее винта, винт продвигается в направлении своей длины и подталкивает прикрепленную к нему доску вверх, чтобы прижать любое вещество, помещенное между ним и закрепленной сверху доской.

В случаях, когда необходимо сжимать жидкости или соки из твердых тел, обычно используется шнек. Он также используется при чеканке монет, когда оттиск штампа должен быть сделан на куске металла, и таким же образом при нанесении оттиска печати на воск или другое вещество, приспособленное для его получения. Когда мягкие и легкие материалы, такие как хлопок, необходимо измельчить до удобной массы для транспортировки, для их сжатия используется шнек, и таким образом они измельчаются в твердую плотную массу. При печати бумага вытягивается при сильном и внезапном надавливании на шрифты с помощью винта.

(296.) Поскольку механическая мощность винта зависит от относительной величины окружности, по которой вращается усилие, и расстояния между резьбами, очевидно, что для повышения эффективности машины мы должны либо увеличить длину рычага, с помощью которого действует усилие, либо уменьшить величину резьбы. Хотя теоретически нет предела повышению механической эффективности с помощью этих средств, все же возникают практические неудобства, которые фактически препятствуют тому, чтобы это

повышение превысило определенную степень. Если увеличить рычаг, с помощью которого действует сила, возникает та же трудность, которая уже объяснялась в "Колесе и оси" ([254.](#)); пространство, через которое должна действовать сила, было бы настолько громоздким, что его применение стало бы практически невозможным. Если, с другой стороны, увеличить мощность машины за счет уменьшения размера нити, прочность нити уменьшится настолько, что при незначительном сопротивлении она оторвется от цилиндра. Случаи, в которых необходимо увеличить мощность машины, являются теми, в которых необходимо преодолеть наибольшее сопротивление, объект, очевидно, потерпит поражение, если средства, выбранные для увеличения этой мощности, лишат машину силы, необходимой для поддержания силы, которой она должна быть подвергнута.

(297.) Эти неудобства устраняются изобретением мистера Хантера, которое, придавая машине всю необходимую прочность и компактность, позволяет ей обладать почти неограниченной степенью механической эффективности.

Это приспособление состоит в использовании двух винтов, резьба которых может иметь любую прочность и величину, но которые имеют очень небольшую разницу в ширине. В то время как рабочая точка продвигается вперед тем, что имеет большую резьбу, она оттягивается назад тем, что имеет меньшую; так что во время каждого оборота винта, вместо того чтобы продвигаться на расстояние, равное величине любой из резьб, она перемещается на расстояние, равное их разнице. Механическая мощность такой машины будет такой же, как у одиночного винта, имеющего резьбу, величина которой равна разнице величин двух только что упомянутых резьб.

Таким образом, без неудобного увеличения мощности, с одной стороны, или, с другой стороны, без уменьшения натяжения нити до тех пор, пока не будет потеряна необходимая прочность, машина приобретет эффективность, ограниченную лишь небольшой разницей между двумя нитями.

Этот принцип был впервые применен способом, представленным на [рис. 142](#). А - большая резьба, выступающая в неподвижной гайке; В - меньшая резьба, нарезанная на меньшем цилиндре и выступающая в вогнутом винте, вырезанном в большем цилиндре. При каждом обороте винта цилиндр А опускается на расстояние, равное расстоянию между его резьбами. В то же время меньший цилиндр В поднимается на расстояние, равное расстоянию между нарезанными на нем нитями: в результате доска D опускается на расстояние, равное разнице между нитями на А и нитями на В, и мощность машины пропорциональна малости этой разницы.

Таким образом, предположим, что винт А имеет двадцать резьб на дюйм, в то время как винт В имеет двадцать одну; за один оборот винт А опустится на расстояние, равное 20-й части дюйма. Если бы во время этого движения винт В не поворачивался внутри А, доска D продвинулась бы на 20 частей дюйма; но поскольку полый винт внутри А поворачивается вокруг В, винт В относительно А будет поднят за один оборот на расстояние, равное 21 части дюйма. Таким образом, в то время как плата D вдавливается на 20 дюймов с помощью винта А, она поднимается на 21 дюйм с помощью винта В. Следовательно, в целом он вдавливается на расстояние, равное превышению 20-й доли дюйма над 21-й долей дюйма, то есть на 420-ю долю дюйма.

Мощность этой машины, следовательно, будет выражаться количеством раз, когда 420-я доля дюйма содержится в окружности, по которой перемещается мощность.

(298.) В практическом применении этого принципа в настоящее время порядок несколько иной. Две резьбы обычно нарезаются на разных частях одного и того же цилиндра. Если предполагается, что на них установлены гайки, способные перемещаться в направлении длины, но не вращаться, то очевидно, что при однократном повороте винта каждая гайка продвинется на расстояние, равное ширине соответствующей резьбы. Таким образом, две гайки будут либо приближаться друг к другу, либо взаимно отступать, в зависимости от направления вращения винта, на расстояние, равное разнице в ширине резьбы, и они будут прилагать усилие, либо сжимающее, либо растягивающее любое вещество, помещенное между ними, пропорциональное малости этой разницы.

(299.) Иногда вместо гайки используется зубчатое колесо, так что для вращения колеса применяется то же качество, с помощью которого вращение винта толкает гайку вперед. Винт в этом случае называется бесконечным винтом, потому что его воздействие на колесо может продолжаться неограниченно. Это применение винта представлено на [рис. 143](#). Р - это лебедка, к которой прилагается мощность; и ее воздействие на окружность колеса оценивается таким же образом, как воздействие винта на гайку. Этот эффект следует рассматривать как мощность, действующую на окружность колеса; и его отношение к весу или сопротивлению должно рассчитываться таким же образом, как отношение мощности к весу колеса и оси.

(300.) До сих пор мы рассматривали винт как двигатель, используемый для преодоления больших сопротивлений. Он также чрезвычайно полезен в нескольких областях экспериментальной науки для измерения мельчайших движений и пространств, величину которых едва ли можно установить какими-либо другими способами. Очень медленное движение, которое может быть придано концу винта очень значительным изменением мощности, делает его особенно хорошо приспособленным для этой цели. Чтобы объяснить способ его применения, предположим, что винт нарезан таким образом, чтобы иметь пятьдесят резьб на дюйм, при каждом обороте винта его острие будет продвигаться на пятидесятую часть дюйма. Теперь предположим, что головка винта представляет собой круг диаметром в дюйм, окружность головки будет несколько больше трех дюймов: ее можно легко разделить на сотню отчетливо видимых равных частей. Если к этой градуированной окружности приложить фиксированный указатель, то можно наблюдать сотую долю оборота винта, отмечая прохождение одного деления головки под указателем. Поскольку за один полный оборот головки точка перемещается на пятидесятую долю дюйма, одно деление будет соответствовать пяти тысячной части дюйма. Чтобы наблюдать за движением кончика винта в этом случае, к нему прикреплена тонкая проволока, которую проводят по полю зрения мощного микроскопа, с помощью которого движение увеличивается настолько, что становится отчетливо различимым.

Винт, используемый для таких целей, называется *микрометрическим*. Такой аппарат обычно прикрепляется к концам градуированных инструментов для целей астрономических и других наблюдений. Без помощи этого аппарата никакое наблюдение не могло бы быть проведено с большей точностью, чем количество мельчайших делений на конечности. Таким образом, если бы прибор для измерения углов был разделен на небольшие дуги продолжительностью в одну минуту и наблюдался угол, который приводил

указатель прибора к некоторой точке между двумя делениями, мы могли бы только заключить, что наблюдаемый угол должен состоять из определенного количества градусов и минут вместе с дополнительным количеством секунд, которое было бы неизвестно, поскольку не было бы средств установить долю минуты между индексом и соседним делением прибора. Но если предусмотреть винт, острие которого перемещается через пространство, равное одному делению инструмента, с шестидесятью оборотами головки, а сама головка разделена на сто равных частей, то каждый полный оборот винта будет соответствовать шестидесятой части минуты, или одной секунде, а каждое деление на головке винта будет соответствовать сотой части секунды. Прикрепив указательный палец к этому винту, позвольте головке поворачиваться до тех пор, пока указательный палец не переместится из наблюдаемого положения в соседний отдел конечности. Количество полных оборотов винта, необходимое для выполнения этого, будет равно количеству секунд; а количество частей оборота по сравнению с полным числом оборотов будет составлять сотые доли секунды, которые необходимо добавить к градусам и минутам, наблюдаемым в первую очередь.

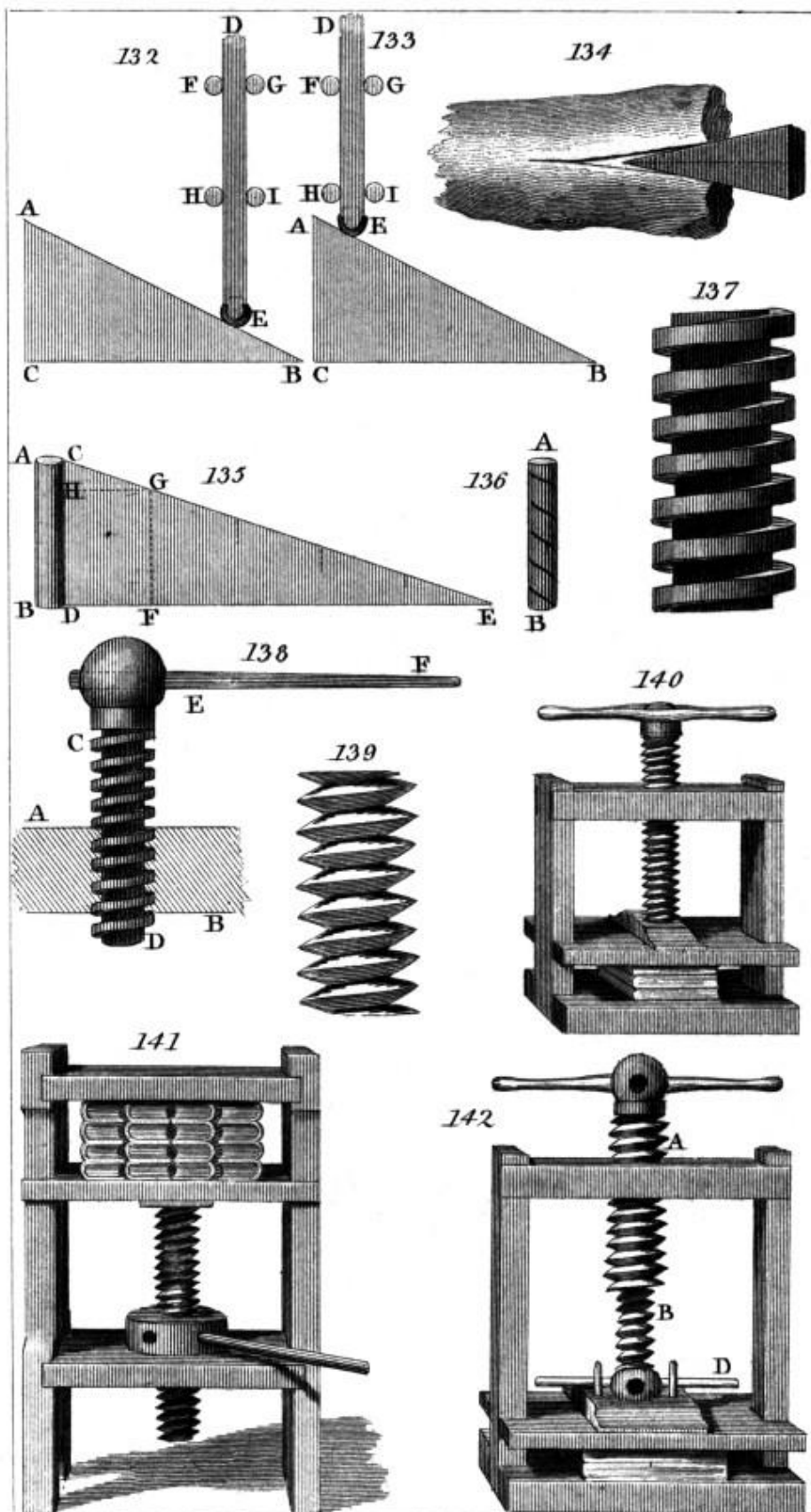
Однако микрометрический винт применим не только к таким приборам; с его помощью можно измерять любые промежутки. Примером его механического применения может служить сталелитейный завод, прибор для определения количества грузов по заданному весу, скользящий по длинному градуированному плечу рычага. Расстояние от точки опоры, на котором этот вес уравнивает вес, подлежащий определению, служит мерой величины этого веса. Когда скользящий груз оказывается помещенным между двумя делениями рычага, для определения доли деления используется микрометрический винт.

Винт Хантера, уже описанный, по-видимому, хорошо приспособлен для микрометрических целей; поскольку движение наконечника может быть сделано бесконечно медленным, не требуя исключительно тонкой резьбы, как это было бы необходимо в одиночном винте.

ГЛАВА XVII.

О РЕГУЛИРОВАНИИ И НАКОПЛЕНИИ СИЛЫ.

(301.) Ит Часто бывает необходимо и всегда желательно, чтобы работа машины была регулярной и равномерной. Внезапные изменения его скорости и беспорядочные колебания эффективной энергии его питания часто вредны или разрушительны для самого устройства, а при применении на производстве неизменно приводят к неравномерности в работе. Таким образом, изобретение методов обеспечения регулярного движения машин путем устранения тех причин неравенства, которых можно избежать, и компенсации других было проблемой, на решение которой было направлено много внимания и изобретательности. Это достигается главным образом путем контроля и, так сказать, отмеривания мощности в соответствии с потребностями машины и обеспечения того, чтобы ее эффективная энергия всегда была соизмерима с сопротивлением, которое ей приходится преодолевать.



Неравномерность движения оборудования может быть вызвана одной или несколькими из следующих причин: 1. неравномерность работы первичного двигателя; 2. случайные изменения величины нагрузки или сопротивления; и 3. поскольку при различных положениях, которые принимают части машины во время ее движения, мощность может передаваться к рабочей точке с неодинаковым эффектом.

Энергия первичного двигателя редко, если вообще когда-либо, постоянна. Сила воды меняется в зависимости от обильности потока. Мощность, приводящая в движение ветряную мельницу, вошла в поговорку. Давление пара меняется в зависимости от интенсивности работы печи. Животную силу, являющуюся результатом воли, темперамента и здоровья, трудно контролировать. Человеческий труд прежде всего неуправляем; следовательно, ни одна машина не работает так нерегулярно, как та, которой манипулируют. В некоторых случаях движущая сила в силу самих условий своего существования подвержена постоянному изменению, как в примере с пружиной, которая постепенно теряет свою энергию при раскручивании. (255.) Во многих случаях ведущий может регулярно прерываться и фактически приостанавливается на определенные промежутки времени. Это имеет место в паровой машине одностороннего действия, где давление пара побуждает поршень опускаться, но приостанавливается во время его подъема.

Нагрузка или сопротивление, к которым прилагается машина, не менее изменчивы. На мельницах имеется множество деталей, которые по отдельности могут время от времени отсоединяться и приостанавливать свою работу. На крупных фабриках по прядению, ткачеству, печати и т. Д. Большое количество отдельных прядильных машин, ткацких станков, прессов или других двигателей обычно приводится в действие одним общим приводом, таким как водяное колесо или паровая машина. В этих случаях количество используемых время от времени машин неизбежно меняется в зависимости от колеблющегося спроса на производимые изделия и по другим причинам. При таких обстоятельствах скорость, с которой перемещается каждая часть механизма, претерпевала бы соответствующие изменения, увеличивая свою быстроту с каждым увеличением движущей силы или уменьшением сопротивления, или замедляясь в скорости из-за противоположных обстоятельств.

Но даже когда и первичный двигатель, и сопротивление являются штатными или приводятся в действие соответствующими приспособлениями, все равно редко случается, чтобы машина, с помощью которой энергия одного передается другому, передавала это с неизменным эффектом на всех этапах своей работы. Дать общее представление об этой причине неравенства тем, кто не был знаком с механизмами, было бы нелегко, не прибегнув к примеру. Пока мы просто констатируем, что несколько движущихся частей каждой машины принимают последовательно различные положения; что через определенные промежутки времени они возвращаются в свое первоначальное положение и снова претерпевают ту же последовательность изменений. В различных положениях, через которые они проходят в каждый период движения, эффективность машины по передаче мощности на сопротивление различна, и, таким образом, эффективная энергия машины при воздействии на сопротивление будет подвержена постоянным колебаниям. Это будет более ясно понято, когда мы перейдем к объяснению методов устранения дефекта или выравнивания воздействия мощности на сопротивление.

Таковы основные причины неравенств, возникающих при движении машин, и теперь мы предлагаем описать некоторые из многих хитроумных приспособлений, созданных искусством инженеров для устранения возникающих неудобств.

(302.) Оставляя пока в стороне последнюю причину неравенства и рассматривая механизм, каким бы он ни был, для передачи мощности на сопротивление без прерываний, очевидно, что любое приспособление, имеющее целью сделать скорость равномерной, может достичь этого только путем обеспечения пропорциональности изменений мощности и сопротивления друг другу. Это может быть сделано либо путем увеличения или уменьшения мощности по мере увеличения или уменьшения сопротивления; либо путем увеличения или уменьшения сопротивления по мере увеличения или уменьшения мощности.

В зависимости от возможностей или удобства, предоставляемых особыми обстоятельствами дела, используется любой из этих методов.

Приспособления для осуществления этого называются *регуляторами*. Большинство регуляторов воздействуют на ту часть машины, которая управляет подачей мощности с помощью рычагов или какого-либо другого механического приспособления, чтобы контролировать количество движущего начала, подаваемого в машину, когда скорость имеет тенденцию к увеличению; и, с другой стороны, увеличивать эту подачу при любом неоправданном снижении ее скорости. На водяной мельнице это достигается воздействием на челнок; на ветряной мельнице - регулировкой парусины; а в паровой машине - открытием или закрытием в большей или меньшей степени клапана, через который в цилиндр подается пар.

(303.) Из всех приспособлений для регулирования механизмов наиболее известным и наиболее часто используемым является *регулятор*. Этот регулятор, который долгое время использовался на мельницах и в других машинах, в последние годы привлек более широкое внимание своей прекрасной адаптацией в паровых двигателях Уатта. Он состоит из тяжелых шариков В В, [рис. 144.](#), прикрепленных к концам стержней В F. Эти стержни опираются на шарнир в точке Е, проходящий через паз в вертикальном стержне D D'. В точке F они соединены шарнирами с короткими стержнями Fh, которые снова соединены шарнирами в точке Н с кольцом, которое скользит по вертикальному стержню Dd'. Из этого описания будет очевидно, что когда шарики В снимаются с оси, их верхние рычаги Ef увеличивают свое расхождение таким же образом, как лезвия ножниц раскрываются путем отделения ручек. Они, воздействуя на кольцо посредством коротких звеньев Fh, тянут его вниз по вертикальной оси от D к Е. Противоположный эффект возникает, когда шарики В приближаются к оси и расхождение стержней Ве уменьшается. Горизонтальное колесо W прикреплено к вертикальной оси D D', имеющее канавку для крепления веревки или ремня на своем ободе. Эта лента проходит вокруг колеса или оси, с помощью которой движение передается на механизм, подлежащий регулированию, так что шпиндель или вал Dd' всегда будет вращаться со скоростью, пропорциональной скорости механизма.

При вращении вала D D' шарики В совершают вокруг него круговое движение и, следовательно, приобретают центробежную силу, которая заставляет их отклоняться от оси и, следовательно, давить на кольцо Н. На краю или ободе этого кольца образован паз, который охватывается зубцами вилки I на конце одного плеча рычага, точка опоры которого находится в точке G. Конец K другого рычага соединен каким-либо образом с той

частью машины, которая подает питание. В данном случае мы предположим, что это паровая машина, и в этом случае шток K_i сообщается с плоским круглым клапаном V , размещенным в главной паровой трубе и расположенным таким образом, что, когда K поднимается настолько, что благодаря их расхождению шарики B имеют над ним власть, проход по трубе перекрывается клапаном V , и прохождение пара полностью прекращается; и, с другой стороны, когда шарики опускаются в свое нижнее положение, клапан будет повернут своим краем в направлении трубы, чтобы не перехватывать часть пара.

Свойство, которое делает этот инструмент столь превосходно приспособленным к цели, для которой он применяется, заключается в том, что, когда расхождение шариков не очень велико, они всегда должны вращаться с одинаковой скоростью, независимо от того, движутся ли они на большем или меньшем расстоянии от вертикальной оси. Если какое-либо обстоятельство увеличивает эту скорость, шарики мгновенно удаляются от оси, и, закрыв клапан V , прекращают подачу пара и, тем самым уменьшая скорость движения, возвращают машину к прежней скорости. Если, напротив, эта фиксированная скорость уменьшается, поскольку центробежной силы больше недостаточно для поддержания шариков, они опускаются к оси, открывают клапан V и, увеличивая подачу пара, восстанавливают надлежащую скорость машины.

Когда регулятор приводится в действие водяным колесом, он воздействует на челнок, через который течет вода, и регулирует ее количество столь же эффективно и по тому же принципу, который только что был объяснен в отношении паровой машины. При применении к ветряной мельнице он регулирует парусину таким образом, чтобы уменьшить эффективность воздействия на рычаги при увеличении силы ветра, или *наоборот*.

В случаях, когда сопротивление допускает легкую и удобную замену, регулятор может действовать таким образом, чтобы приспособить его к изменяющейся энергии источника питания. Это часто делается на кукурузных мельницах, где воздействует на челнок, который дозирует зерно к жерновам. Когда мощность, приводящая в движение мельницу, увеличивается, на камни подается пропорционально увеличенная подача зерна, так что при изменении сопротивления в зависимости от мощности будет поддерживаться та же скорость.

(304.) В некоторых случаях центробежная сила вращающихся шариков недостаточно велика для регулирования мощности или сопротивления, и приходится прибегать к регуляторам другого типа. Следующее устройство называется *регулятором воды*:-

Машина приводится в действие обычным насосом, движение которого необходимо регулировать, и таким образом вода поднимается и сливается в резервуар. Ему разрешается вытекать из этого резервуара по трубе заданной величины. Когда вода закачивается вверх с той же скоростью, с какой она выпускается по этой трубе, очевидно, что уровень воды в резервуаре будет постоянным, поскольку он получает от насоса именно то количество, которое он выпускает из трубы. Но если насос за определенное время закачает больше воды, чем отводится по трубе, резервуар начнет наполняться, и уровень воды поднимется. С другой стороны, если подача из насоса будет меньше, чем выпуск из трубы, уровень воды в резервуаре понизится. Поскольку скорость, с которой вода подается из насоса, всегда будет пропорциональна скорости машины, отсюда следует, что каждое колебание этой скорости будет обозначаться повышением или понижением уровня воды в резервуаре, и этот уровень

никогда не может оставаться постоянным, за исключением той точной скорости, которая обеспечивает количество воды, выпускаемой по трубе. Эта труба может быть сконструирована таким образом, чтобы с помощью регулировки сливать воду с любой требуемой скоростью; и, таким образом, резервуар может быть приспособлен для индикации постоянной скорости любого предлагаемого количества.

Если бы за цистерной постоянно наблюдал обслуживающий персонал, скорость машины можно было бы снизить, регулируя мощность, когда наблюдается повышение уровня воды, или увеличивая, когда он падает; но это гораздо эффективнее и регулярнее выполняется, заставляя поверхность воды выполнять свою функцию самостоятельно. Поплавков или большой полый металлический шар помещается на поверхность воды в резервуаре. Этот шарик соединен с рычагом, действующим на какую-либо часть механизма, который управляет мощностью или регулирует величину сопротивления, как уже объяснялось в случае с регулятором. Когда уровень воды повышается, плавучесть мяча заставляет его подниматься также с силой, равной разнице между его собственным весом и весом того количества воды, которое он вытесняет. Увеличивая плавающий шар, можно получить силу, достаточно большую, чтобы привести в движение те части механизма, которые воздействуют на мощность или сопротивление, и, таким образом, либо уменьшить подачу движущего начала, либо увеличить величину сопротивления, и тем самым замедлить движение и снизить скорость до надлежащего предела. Когда уровень воды в резервуаре падает, плавающий шар, больше не удерживаемый на поверхности жидкости, опускается под действием собственного веса и, оказывая влияние на мощность или сопротивление, противоположное первому, увеличивает эффективную энергию одного или уменьшает энергию другого до тех пор, пока скорость, присущая машине, не будет восстановлена.

Чувствительность этих регуляторов повышается за счет уменьшения поверхности воды в резервуаре; в этом случае небольшое изменение скорости подачи воды насосом приведет к значительному изменению уровня воды в резервуаре.

Вместо использования поплавка сам резервуар может быть подвешен к рычагу, который управляет подачей электроэнергии, и в этом случае на другой рычаг может быть помещен скользящий груз, чтобы он уравнивал резервуар, когда в нем содержится то количество воды, которое соответствует фиксированному уровню, о котором уже говорилось. Если количество воды в бачке будет увеличено из-за чрезмерной скорости вращения машины, вес бачка будет преобладать, что приведет к опусканию плеча рычага и остановке подачи питания. С другой стороны, если запас воды будет слишком мал, резервуар больше не будет уравнивать противовес, рычаг, на котором он подвешен, будет поднят, и энергия источника питания увеличится.

(305.) В паровой машине принцип саморегулирования доведен до поразительной степени совершенства. Машина сама поднимает в нужном количестве холодную воду, необходимую для конденсации пара. Он откачивает горячую воду, образующуюся при охлаждении пара, и помещает ее в резервуар для питания котла. Он подает из этого резервуара именно то количество воды, которое необходимо для обеспечения потребностей котла, и помещает ее в него в соответствии с требованиями. Он отводит из котла избыточный пар и сохраняет тот, который остается пригодным как по количеству, так и по качеству для использования двигателем. Он раздувает свой собственный огонь, поддерживая его интенсивность и увеличивая или уменьшая ее в зависимости от количества пара, которое необходимо

поднять; так что, когда от двигателя ожидается большая работа, огонь получается пропорционально ярким. Он разламывает и готовит свое собственное топливо и разбрасывает его по решеткам в нужное время и в должном количестве. Он открывает и закрывает свои многочисленные клапаны в нужные моменты, приводит в действие свои собственные насосы, вращает свои собственные колеса и всего лишь неживой. Среди стольких прекрасных примеров принципа саморегулирования трудно выбрать. Мы, однако, упомянем об одном или двух, а за остальными отсылаем читателя к нашему трактату по этому предмету.³

В этой машине необходимо, чтобы уровень воды в бойлере постоянно поддерживался на одном и том же уровне и, следовательно, время от времени подавалось столько воды, сколько расходуется на испарение. Насос, приводимый в действие самим двигателем, подает горячую воду в резервуар С, [рис. 145](#). На дне этого резервуара находится клапан V, открывающийся в трубу, которая спускается в котел. Этот клапан соединен проволокой с плечом рычага на точке опоры D, другое плечо E которого также соединено проволокой с каменным поплавком F, который частично погружен в воду котла и уравновешен скользящим грузом А. Вес А уравнивает каменный поплавок F только за счет его плавучести в воде; ибо, если воду удалить, камень F будет преобладать и поднимать вес А. Когда вода в котле достигнет нужного уровня, длина провода, соединяющего клапан V с рычагом, регулируется таким образом, чтобы этот клапан был закрыт, при этом провод должен быть полностью вытянут. Когда в результате испарения воды в котле начинает убывать, уровень падает, и каменный груз F, который больше не поддерживается, преодолевает противовес А, поднимает плечо рычага и, потянув за проволоку, открывает клапан V. Затем вода из резервуара С поступает по трубе в котел и продолжает поступать до тех пор, пока уровень не поднимется настолько, что вес камня F снова будет поднят, клапан V закрыт и дальнейшая подача воды из резервуара С приостановлена.

Чтобы сделать работу этого аппарата легко понятной, мы предположили здесь несовершенство, которого не существует. Согласно тому, что только что было сказано, уровень воды в бойлере снижается с надлежащей высоты, а затем возвращается к ней. Но на самом деле этого не происходит. Поплавок F и клапан V регулируются сами по себе, так что через клапан проходит постоянная подача воды, которая происходит точно с той же скоростью, с какой расходуется вода в бойлере.

(306.) В той же машине есть исключительно удачный пример саморегулирования, заключающийся в методе, с помощью которого регулируется сила огня. Регулятор регулирует подачу пара в двигатель и соразмеряет ее с выполняемой работой. Следовательно, при этой работе требования к котлу увеличиваются или уменьшаются, и в соответствии с этими требованиями выработка пара в котле должна изменяться. Фактически, скорость, с которой пар вырабатывается в котле, должна быть равна скорости, с которой он расходуется в двигателе, в противном случае должно наступить одно из двух последствий: либо котел не сможет снабжать двигатель паром, либо пар будет накапливаться в котле, вырабатываясь в чрезмерном количестве, и, выходя через предохранительный клапан, будет, таким образом, расходоваться впустую. Следовательно, необходимо контролировать вещество, вырабатывающее пар, а именно огонь, и время от времени изменять его интенсивность, соразмеряя ее с потребностями двигателя. Для достижения этой цели было принято следующее изобретение: —Пусть T, [рис. 146](#),

представляет собой трубку, вставленную в верхнюю часть котла и опускающуюся почти до дна. Давление пара, заключенного в котле, действуя на поверхность воды, поднимает ее на определенную высоту в трубе Т. Груз F, наполовину погруженный в воду в трубе, подвешен на цепи, которая проходит через колеса Pp', и уравновешен металлической пластиной D таким же образом, как каменный поплавок, [рис. 145](#), уравновешен весом А. Пластина D проходит через отверстие дымохода Е, когда он окончательно выходит из котла; так что, когда пластина D опускается, она останавливает дымоход, приостанавливая, таким образом, подачу воздуха через печь, уменьшая интенсивность горения и ограничивая выработку пара. Если, напротив, поднять плиту D, то тяга увеличивается, огонь становится более активным и стимулируется выработка пара в котле. Теперь предположим, что котел вырабатывает пар быстрее, чем двигатель его потребляет, либо потому, что нагрузка на двигатель уменьшилась, и, следовательно, потребление им пара уменьшилось, либо потому, что огонь стал слишком интенсивным; следствием этого является то, что пар, начиная скапливаться в котле, будет давить на поверхность воды с увеличенной силой, и вода будет подниматься в трубе Т. Следовательно, вес F будет поднят, а пластина D опустится, уменьшит или остановит тягу, уменьшит огонь и замедлит выработку пара, и это будет продолжаться до тех пор, пока скорость, с которой вырабатывается пар, не будет соизмерима с потребностями двигателя. Если, с другой стороны, выработка пара недостаточна для требований машины, либо из-за повышенной нагрузки, либо из-за недостаточной силы огня, пар в котле потеряет свою эластичность, а поверхность воды не выдержит его обычного давления, вода в трубе Т упадет; следовательно, вес F опустится, и плита D поднимется. При таком открытии дымохода тяга увеличивается, а огонь становится более интенсивным. Таким образом, выработка пара становится более быстрой и его количество становится достаточным для работы двигателя. Это устройство называется *самодельствующим демпфером*.

(307.) Когда не достигнута идеально равномерная скорость движения, часто бывает необходимо указать небольшие изменения скорости. Для достижения этой цели было изобретено следующее устройство, называемое *тахометром*⁴. Чашка, [рис. 147](#), наполняется ртутью до уровня C D и прикрепляется к шпинделю, который вращается машиной таким же образом, как уже описанный регулятор. Хорошо известно, что центробежная сила, создаваемая этим вращательным движением, заставит мерный стакан отступать от центра и подниматься по бокам чашки, так что его поверхность примет вогнутый вид, представленный на [рис. 148](#). В этом случае центр поверхности, очевидно, опустится ниже своего первоначального уровня, [рис. 147](#), а края поднимутся выше этого уровня. Поскольку этот эффект вызывается скоростью машины, он пропорционален этой скорости и подвержен соответствующим изменениям. Любой метод визуализации видимых небольших изменений на центральном уровне поверхности ртути укажет на незначительные изменения скорости машины.

Стеклянную трубку А, открытую с обоих концов и расширяющуюся на одном конце в раструб В, погружают более широким концом в ртуть, поверхность которой будет находиться на одном уровне в раструбе В и в чашке C D. Тюбик подвешен таким образом, чтобы не соединяться с чашкой. Затем этот тюбик наполняется до определенной высоты спиртом, окрашенным каким-либо веществом, чтобы сделать его легко различимым. Когда чаша вращается машиной, к которой она прикреплена, уровень ртути в колпаке падает, оставляя больше места для спирта, который, следовательно, стекает в трубку. По мере

продолжения движения каждое изменение скорости вызывает соответствующее изменение уровня ртути и, следовательно, также уровня А духов. Следует заметить, что вследствие того, что емкость колокола В намного больше емкости трубки А, очень небольшое изменение уровня ртути в колоколе вызовет значительное изменение высоты спирта в трубке. Таким образом, этот хитроумный прибор становится очень тонким индикатором изменений в движении механизмов.

(308.) Регулятор и другие методы регулирования движения механизмов, которые были только что описаны, приспособлены главным образом к случаям, в которых отношение сопротивления к нагрузке подвержено определенным колебаниям или постепенным изменениям, или, по крайней мере, к случаям, в которых сопротивление ни в коем случае не снимается полностью и энергия мощности фактически не приостанавливается. Однако часто возникают обстоятельства, при которых, в то время как мощность остается в полной активности, сопротивление через определенные промежутки времени внезапно устраняется и так же внезапно снова возвращается. С другой стороны, также встречаются случаи, когда, пока продолжается сопротивление, движущая сила периодически ослабевает. В первом случае машина приводилась бы в движение с разрушительной быстротой в те периоды, когда она освобождается от груза, а при возврате груза каждая деталь испытывала бы сильное напряжение из-за попытки сохранить скорость, которую она приобрела, и быстрое разрушение двигателя не могло не последовать. В последнем случае движение было бы значительно замедлено или полностью приостановлено в те периоды, когда движущая сила лишена своей активности, и, следовательно, движение, которое она сообщала бы, было бы настолько нерегулярным, что было бы бесполезно для производственных целей.

Также часто желательно с помощью слабой, но продолжительной мощности добиться сильного, но мгновенного эффекта. Таким образом, может потребоваться, чтобы удар был нанесен мускульным действием руки человека с силой, которой без помощи механических приспособлений было бы совершенно недостаточно.

Во всех этих случаях очевидно, что цель, которой необходимо достичь, - это эффективный метод накопления энергии силы таким образом, чтобы сделать ее доступной после прекращения действия, посредством которого она была произведена. Таким образом, в случае, когда груз периодически извлекается из машины, если бы силу приведения в действие можно было передать чему-то, с помощью чего она сохранялась бы, чтобы при ее повторном возвращении упираться в груз, неудобство было бы устранено. Аналогичным образом, в случае, когда сама мощность подлежит отключению, если бы часть силы, которую она прилагает в интервалах своего действия, могла быть накоплена и сохранена, она могла бы воздействовать на машину в периоды ее приостановки. С помощью тех же средств накопления силы сила младенца при повторных усилиях может произвести эффекты, которые были бы тщетны при единичном и мгновенном действии самого сильного человека.

(309.) Свойство инерции, объясненное и проиллюстрированное в третьей и четвертой главах этого тома, предоставляет простой и эффективный метод достижения этой цели. Масса вещества сохраняет, в силу своей инерции, всю силу, которая могла быть ей придана, за исключением той части, которой ее лишают трение и атмосферное сопротивление. С помощью хорошо известных и не представляющих трудности приспособлений часть

потерянной таким образом движущей силы может быть сделана сравнительно небольшой, и можно рассматривать движущуюся массу как удерживающую почти всю приложенную к ней силу. Чтобы сделать этот метод накопления силы полностью понятным, давайте сначала представим себе отполированную ровную плоскость, на которой установлен тяжелый металлический шар, также отполированный. Очевидно, что земной шар будет оставаться неподвижным в любой части плоскости без тенденции двигаться в каком-либо направлении. Поскольку трение практически устраняется полировкой поверхностей, глобус будет легко перемещаться при наименьшем усилии, приложенном к нему. Предположим, что ему был дан небольшой импульс, который заставил бы его двигаться со скоростью один фут в секунду. Исключая эффекты трения, он будет продолжать двигаться с такой скоростью в течение любого промежутка времени. Повторение того же импульса увеличит его скорость до двух футов в секунду. Третий импульс - до трех футов и так далее. Таким образом, 10 000 повторений импульса заставят его двигаться со скоростью 10 000 футов в секунду. Если бы тело, которому были переданы эти импульсы, было пушечным ядром, его можно было бы, путем постоянного повторения движущей силы, в конце концов заставить двигаться с такой силой, как если бы оно было выпущено из самого мощного боеприпаса. Сила, с которой мяч в таком случае ударился бы о здание, могла бы быть достаточной, чтобы превратить его в руины, и все же такая сила была бы не чем иным, как суммированием ряда слабых усилий, которые не под силу приложить ребенку, которые накапливаются и как бы сохраняются движущейся массой и, таким образом, одновременно воздействуют на точку, к которой направлена сила. Это сумма ряда действий, выполняемых последовательно и в течение длительного промежутка времени приводимых в действие в один и тот же момент.

Но случай, который здесь предполагается, на самом деле произойти не может; потому что обычно у нас нет никаких практических средств перемещать тело в течение сколько-нибудь значительного времени в одном и том же направлении без сильного трения и без столкновения с многочисленными препятствиями, которые препятствовали бы его продвижению. Однако для достижения желаемого эффекта не обязательно, чтобы движение было прямолинейным. Если к концу легкого стержня или шнура прикрепить свинцовый груз и вращать его усилием руки по кругу, он постепенно приобретет увеличенную скорость и силу и, наконец, может получить импульс, который заставит его пробить кусок доски так же эффективно, как если бы он был выпущен из мушкета.

Сила удара молотком или кувалдой частично зависит от их веса, но в гораздо большей степени от только что объясненного принципа. Если бы ему было позволено просто упасть силой своего веса на шляпку гвоздя или на брусок раскаленного железа, который нужно расплющить, эффект был бы незначительным. Но когда им владеет рука человека, оно получает в каждый момент своего движения возрастающую силу, которая в конце концов расходуется в одно мгновение на шляпку гвоздя или на железный прут.

Действие цепов при молотбе, дубинок, хлыстов, тростей и орудий для нанесения ударов, топоров, топориков, тесаков и всех инструментов, наносящих удары, зависит от того же принципа и объясняется аналогичным образом.

Тетива, приводящая в движение стрелу, не производит своего действия сразу. Он продолжает воздействовать на древко до тех пор, пока оно не примет свое прямое

положение, и тогда стрела отправляется в полет с силой, накопленной за время непрерывного натягивания тетивы, с того момента, как она была снята с пальца лучника.

Само огнестрельное оружие действует по аналогичному принципу, как и пневматическое ружье и паровая пушка. В этих приборах шарик помещается в трубку и внезапно подвергается воздействию давления высокоэластичной жидкости, возникающей либо в результате взрыва, как в огнестрельном оружии, либо в результате предварительной конденсации, как в пневматическом пистолете, либо в результате испарения сильно нагретых жидкостей, как в паровом пистолете. Но в любом случае это давление продолжает действовать на него до тех пор, пока он не покинет устье трубки, а затем он удаляется со всей силой, сообщаемой ему при прохождении по трубке.

(310.) Из всех этих соображений легко понять, что массу инертной материи можно рассматривать как хранилище, в котором может откладываться и накапливаться сила для использования любым способом, который может оказаться необходимым. По многим причинам, которые будут достаточно очевидны, форма, обычно придаваемая массе вещества, используемой для этой цели в машинах, имеет форму колеса, на ободе которого оно в основном собирается. Представьте себе массивное металлическое кольцо, [рис. 149](#), соединенное с центральной коробкой или ступицей легкими спицами и вращающееся вокруг оси с небольшим трением. Такой аппарат называется маховиком. Если к нему приложить какую-либо силу, то с помощью этой силы (с небольшим вычетом трения) он будет двигаться и будет продолжать двигаться до тех пор, пока его движению не будет противопоставлено какое-либо препятствие, которое получит от него часть приобретенной им силы. Использование этого устройства будет легко понято на примерах его применения.

Предположим, что тяжелую штамповку или молоток нужно поднять на определенную высоту, а затем позволить им упасть, и что для этой цели используется водяное колесо. Пока штамповщик поднимается, мощность колеса почти уравнивается его весом, и движение машины происходит медленно. Но в тот момент, когда стампер отсоединяется и ему позволяют упасть, сила колеса, не имеющая ни сопротивления, ни какого-либо объекта, на который можно было бы себя израсходовать, внезапно разгоняет машину, которая движется со скоростью, пропорциональной величине мощности, до тех пор, пока она снова не зацепит стампер, после чего ее скорость так же внезапно снижается. Каждая деталь испытывает нагрузку, и машина снова движется медленно, пока не разрядит свою нагрузку, когда она снова ускоряется, и так далее. В этом случае, помимо вероятности получения травм и износа, а также вероятности перелома из-за внезапных и частых изменений скорости, теряется почти вся сила, прилагаемая приводом в промежутках между началом каждого спуска стампера и следующим подъемом. Эти дефекты устраняются маховиком. Когда стампер разряжен, энергия привода расходуется на перемещение колеса, которое из-за своей большой массы не будет развивать чрезмерную скорость. В промежутке между спуском и подъемом стампера вся сила привода сосредоточена на тяжелом ободе маховика. Когда машина снова поднимает штамповку, эта сила воздействует на нее в сочетании с непосредственной мощностью водяного колеса, и штамповка поднимается почти с той же скоростью, с какой машина двигалась в промежутке между ее спуском.

(311.) Во многих случаях, когда движущая сила не подвержена изменению, эффективность машины по передаче ее к рабочему месту постоянно меняется. Отдельные части каждой машины имеют определенные периоды движения, во время которых они занимают

различные положения, к которым они постоянно возвращаются через установленные промежутки времени. В этих различных положениях воздействие мощности, передаваемой на рабочую точку, различно; и даже бывают случаи, когда это воздействие полностью исчезает, и машина оказывается в затруднительном положении, в котором мощность теряет всякое влияние на вес. В таких случаях помощь маховика эффективна и незаменима. В тех фазах работы машины, которые наиболее благоприятны для передачи усилия, маховик разделяет воздействие мощности с грузом и, сохраняя полученное таким образом усилие, направляет его на груз в моменты, когда передача мощности машиной либо слаба, либо вообще приостановлена. Эти общие наблюдения, возможно, будут более ясно восприняты на примере применения маховика в случае, подобном тому, о котором сейчас идет речь.

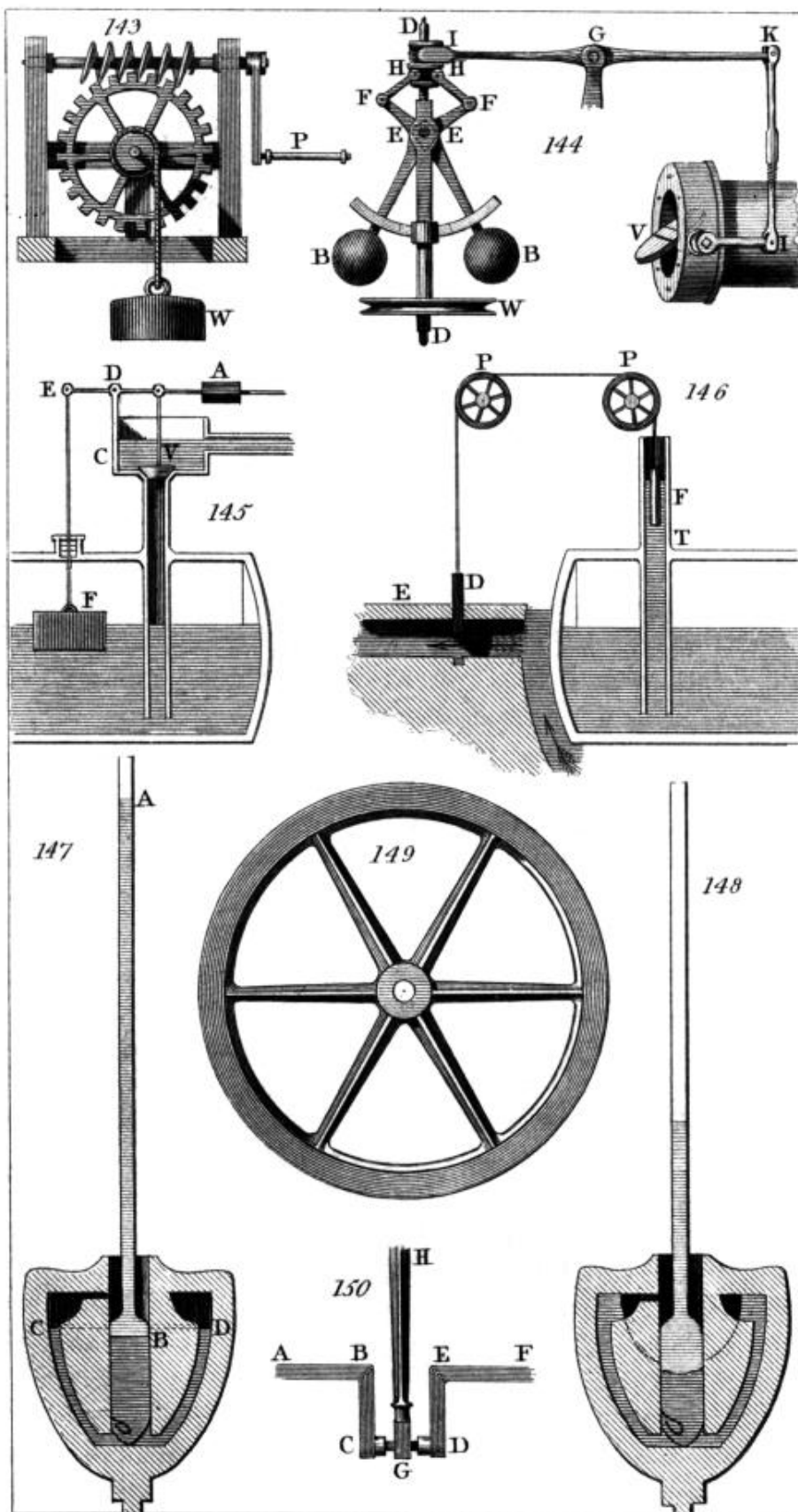
Пусть $A B C D E F$, [рис. 150](#), - кривошип, представляющий собой двойную лебедку ([252](#)), а [рис. 89](#)), с помощью которого должна поворачиваться ось $A B E F$. К середине Cd шарниром прикреплен стержень, который соединен с балкой, приводимой в движение попеременным движением по центру, подобно тормозу насоса, и приводимой в движение любой постоянной мощностью, такой как паровая машина. Стержень Cd следует перемещать круговым движением вокруг оси $A E$. Пусть машина, рассматриваемая в направлении $Ab Ef$ оси, будет представлена на [рис. 151](#), где A обозначает центр, вокруг которого должно производиться движение, а G - точку, где шатун Gh прикреплен к плечу кривошипа. Окружность, через которую стержень должен проходить G , обозначена пунктирной линией. В положении, представленном на [рис. 151](#), стержень, действующий в направлении Hg , имеет полную мощность для поворота рукоятки Ga вокруг центра A . Когда кривошип входит в положение, представленное на [рис. 152](#), эта мощность уменьшается, и когда точка G оказывается непосредственно под точкой A , как на [рис. 153](#), усилие в направлении Hg не влияет на поворот кривошипа вокруг точки A , а, наоборот, полностью расходуется на вытягивание кривошипа в направлении точки G , и, следовательно, действует только на шарниры, которые поддерживают ось. Следовательно, при этом кризисе движения вся эффективная энергия мощности уничтожается.

После перехода кривошипа в положение, представленное на [рис. 154](#), направление силы, действующей на шатун, изменяется, и теперь кривошип тянется вверх в направлении $G H$. В этом положении движущая сила обладает некоторой эффективностью для создания вращения по кругу A , эффективность которого постоянно возрастает до тех пор, пока кривошип не достигнет положения, показанного на [рис. 155](#), когда его мощность будет наибольшей. Начиная с этого положения, его эффективность постоянно снижается, пока точка G не окажется непосредственно над осью A , [рис. 156](#). Здесь мощность снова теряет всю свою эффективность при повороте оси. Очевидно, что сила в направлении Gh или Hg не может произвести никакого другого эффекта, кроме напряжения на шарнирах или рычагах.

В критических ситуациях, представленных на [рис. 153](#) и [рис. 156](#), машина была бы неспособна двигаться, если бы единственным движущим принципом была непосредственная сила двигателя. Но, побывав ранее в движении благодаря инерции ее различных частей, она имеет тенденцию продолжать движение; и если сопротивление нагрузки и эффекты трения не слишком велики, эта склонность сохранять свое состояние движения выведет машину из дилеммы, в которую она попадает в только что упомянутых

случаях, благодаря особому расположению ее частей. Однако во многих случаях сила, приобретаемая таким образом во время фаз работы машины, на которых мощность активна, недостаточна для прохождения ее через мертвые точки ([рис. 153.](#) и [рис. 156.](#)); и во всех случаях движение было бы очень неравномерным, постоянно замедляясь по мере приближения к этим точкам и постоянно ускоряясь после их прохождения. Маховик, прикрепленный к оси А или к какой-либо другой части механизма, эффективно устранит этот дефект. Когда кривошип принимает положения, указанные на [рис. 151.](#) и [рис. 155.](#), мощность на нем задействована в полную силу, и часть эффекта передается массивному ободу маховика. Когда кривошип попадает в затруднительное положение, показанное на [рис. 153.](#) и [рис. 156.](#), импульс, который маховик получил, когда кривошип действовал с наибольшей выгодой, немедленно выводит машину из мертвой точки и, выводя кривошип за пределы мертвой точки, снова приводит в действие привод.

Поразительные эффекты маховика как аккумулятора силы привели некоторых к ошибочному предположению, что такое устройство увеличивает реальную мощность машины. Хотелось бы, однако, надеяться, что после того, что было объяснено относительно инерции материи и истинных эффектов машин, читатель не будет подвержен подобной ошибке. Напротив, поскольку муха не может действовать без трения, и поскольку величина трения, как и величина инерции, пропорциональна весу, часть фактической движущей силы неизбежно должна быть потеряна при использовании мухи. В тех случаях, однако, если муха правильно применять это потеря мощности незначительна, по сравнению с выгодными распределение того, что осталось.



К. Варли, дел. Х. Адлард, sc.

Лондон, издательство Longman & Co.

Как аккумулятор силы, муха никогда не может обладать большей силой, чем было приложено для приведения ее в движение. В этом отношении он аналогичен упругой пружине, или силе конденсированного воздуха, или любой другой силе, которая возникает из чисто механических причин. При изгибе пружины необходимо постепенное расходование энергии. При отдаче эта мощность затрачивается за гораздо меньшее время, чем при ее производстве, но ее общее количество не изменяется. Воздух конденсируется путем последовательности ручных усилий, одно из которых само по себе было бы неспособно выбросить свинцовый шар со сколько-нибудь значительной силой, и все они не могли бы быть немедленно приложены к шару в одно и то же мгновение. Но резервуар конденсированного воздуха - это хранилище, в котором накоплено большое количество таких усилий, чтобы их можно было сразу же привести в действие. Если мяч подвергнется их воздействию, он может вылететь с разрушительной силой.

Таким образом, на станах для прокатки металла используется маховик. Водяному колесу или другой движущей силе разрешается в течение некоторого времени воздействовать только на маховик, при этом на машину не возлагается никакая нагрузка. Таким образом достигается усилие, достаточное для прокатки большого куска металла, для чего без таких средств мельница была бы совершенно непригодна. Таким же образом рука человека, воздействующая на муху в течение нескольких секунд, может получить силу, достаточную для того, чтобы мгновенным ударом нанести изображение на кусок металла. Таким образом, муха является основным агентом в чеканных прессах.

(312.) Мощность маховика часто передается к рабочей точке с помощью винта. На концах поперечного рычага *Ab*, [рис. 157](#), который приводит в действие винт, размещены два тяжелых металлических шарика. Когда рычаг *Ab* вращается, эти массы металла приобретают импульс, благодаря которому винт, приводимый в движение вниз, с огромной силой прижимает матрицу к материалу, предназначенному для получения оттиска.

Некоторые двигатели, используемые при чеканке монет, имеют мушки с руками длиной в четыре фута, несущие по сто килограммов веса на каждом из своих концов. Поворачивая такой рычаг со скоростью один полный обхват в секунду, матрица будет вдавливаться в металл с такой же силой, с какой 7500 фунтов веса упали бы с высоты 16 футов; огромная мощность, если принять во внимание простоту и компактность машины.

Место, которое должно быть отведено маховику относительно других частей механизма, определяется целью, для которой он используется. Если он предназначен для выравнивания действия, то должен находиться рядом с рабочей точкой. Таким образом, в паровой машине он установлен на рукоятке, которая вращает ось, с помощью которой мощность двигателя передается на объект, на который он в конечном итоге призван воздействовать. Напротив, в ручных мельницах, таких как те, которые обычно используются для помола кофе и т. Д., Он устанавливается на оси лебедки, с помощью которой приводится в действие машина.

Открытая работа щитков, каминных решеток и подобных декоративных изделий, изготовленных из металла, производится действием мухи уже описанным способом. Режущий инструмент, имеющий форму в соответствии с выполняемым рисунком, крепится к концу винта; а поскольку металл удерживается в надлежащем положении под ним, то мушка предназначена для того, чтобы толкать инструмент вниз с такой силой, чтобы вытеснять куски требуемой фигуры. Когда рисунок сложный и необходимо с точностью сохранить взаимное расположение его различных частей, несколько ударов наносятся

одновременно, чтобы нанести удар по всему куску металла в одно и то же мгновение, и таким образом наиболее сложная ажурная работа выполняется одним ударом.

ГЛАВА XVIII.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ.

(313.) ТеКлассы простых машин, обозначаемые как механические мощности, имеют отношение главным образом к особому принципу, который определяет действие мощности на вес или сопротивление. При объяснении этого устройства к нашим исследованиям были случайно примешаны различные другие соображения; и все же многое еще предстоит раскрыть, прежде чем изучающий сможет составить правильное представление о тех средствах, с помощью которых сложный механизм, используемый в искусстве и мануфактурах, столь эффективно достигает целей, на достижение которых он направлен.

Сила данной энергии, противодействующая сопротивлению другой энергии, или движущий принцип, имеющий заданную скорость, генерирующий другую скорость другой величины, - это лишь одна из многих задач, на которые должна воздействовать машина. В искусстве и производстве *вид* производимого движения, как правило, имеет большее значение, чем его *скорость*. Последнее может повлиять на объем работы, выполняемой за данное время, но первое имеет важное значение для выполнения работы в любом количестве. При практическом применении машин цель, которая должна быть достигнута, обычно состоит в том, чтобы сообщить рабочей точке какой-то особый вид движения, подходящий для целей, для которых предназначена машина; но редко случается, чтобы движущая сила имела такой вид движения. Следовательно, машина должна быть сконструирована таким образом, чтобы, хотя та часть, на которую действует эта сила, была способна двигаться, повинаясь ей, ее связь с другими частями должна быть такой, чтобы рабочая точка могла получать то движение, которое необходимо для целей, для которых применяется машина.

Чтобы дать совершенное решение этой проблемы, необходимо было бы объяснить, во-первых, все разновидности движущих сил, которые имеются в нашем распоряжении; во-вторых, все разнообразие движений, которые может потребоваться произвести; и, в-третьих, показать все методы, с помощью которых можно заставить каждую разновидность первичного двигателя производить несколько видов движения в рабочей точке. Очевидно, что такое перечисление было бы непрактичным, и даже приближение к нему было бы неподходящим для настоящего трактата. Тем не менее, во многих устройствах для модификации движения было проявлено столько изобретательности, и знакомство с некоторыми из них настолько важно для ясного понимания природы и работы сложных машин, что было бы неправильно опустить некоторые сведения, по крайней мере, о тех, которые наиболее часто встречаются в механизмах или которые наиболее бросаются в глаза элегантностью и простотой.

Разновидности движения, которые наиболее часто встречаются при практическом применении механики, можно разделить на *прямолинейные* и *вращательные*. При прямолинейном движении несколько частей движущегося тела движутся по параллельным прямым линиям с одинаковой скоростью. При вращательном движении несколько точек

вращаются вокруг оси, каждая из которых совершает полный круг или аналогичные части круга за одно и то же время.

Каждый из них снова может быть разделен на непрерывный и возвратно-поступательный. При непрерывном движении, будь то прямолинейное или вращательное, детали постоянно движутся в одном и том же направлении, будь то по параллельным прямым линиям или при вращении вокруг оси. При возвратно-поступательном движении несколько деталей перемещаются попеременно в противоположных направлениях, непрерывно пересекая одни и те же промежутки из конца в конец. Таким образом, существуют четыре основных вида движения, которые чаще, чем какие—либо другие, воздействуют на машины или должны передаваться ими:

- | | | | |
|----|--|-----------------------|------------------|
| 1. | <i>Продолжение</i> | <i>прямолинейного</i> | <i>движения.</i> |
| 2. | <i>Возвратно-поступательное</i> | <i>прямолинейное</i> | <i>движение.</i> |
| 3. | <i>Непрерывное</i> | <i>круговое</i> | <i>движение.</i> |
| 4. | <i>Возвратно-поступательное круговое движение.</i> | | |

Это будет более понятно на примерах каждого вида.

Продолжающееся прямолинейное движение наблюдается при течении реки, при падении воды, при дуновении ветра, при движении животного по прямой дороге, при перпендикулярном падении тяжелого тела, при движении тела по наклонной плоскости.

Возвратно-поступательное прямолинейное движение наблюдается в поршне обычного шприца, в штоке обычного насоса, в молотке укладчика, поршне паровой машины, штамповках валяного стана.

Непрерывное круговое движение проявляется во всех видах работы с колесами и настолько распространено, что описывать его отдельно излишне.

Возвратно-поступательное круговое движение наблюдается в маятнике часов и в часовом баланси́ре.

Теперь мы объясним некоторые ухищрения, с помощью которых сила, обладающая одним из этих движений, может быть использована для передачи либо того же вида движения, измененного по скорости или направлению, либо любого из трех других видов движения.

(314.) При продолжающемся прямолинейном движении одним или несколькими неподвижными шкивами может быть произведено другое продолжающееся прямолинейное движение в другом направлении. Пропущенный через них шнур, один конец которого приводится в движение источником питания, будет передавать то же движение без изменений на другой конец. Если направления двух движений пересекаются, будет достаточно одного неподвижного шкива; см. [рис. 113](#), где рука принимает направление одного движения, а вес - другого. В этом случае шкив должен располагаться под углом, под которым направления двух движений пересекаются друг с другом. Если этот угол находится далеко от мест, под которыми расположены движущиеся объекты, может потребоваться веревка неудобной длины. В этом случае то же самое может быть достигнуто с помощью двух шкивов, как показано на [рис. 158](#).

Если направления двух движений параллельны, необходимо использовать два шкива, как показано на [рис. 158](#), где $P'A'$ - одно движение, а Bw - другое. В этих случаях оси двух колес параллельны.

Может случиться так, что направления двух движений не пересекаются и не параллельны. Это произошло бы, например, если бы направление одного из них лежало на бумаге по линии Pa , в то время как другое было бы перпендикулярно бумаге из точки O . В этом случае следует использовать два шкива, ось одного из которых O' должна быть перпендикулярна бумаге, в то время как ось другого O должна находиться на бумаге. Это станет очевидным после небольшого размышления.

В общем, ось каждого шкива должна быть перпендикулярна двум направлениям, в которых канат выходит из паза; и при должном внимании к этому условию будет видно, что непрерывное прямолинейное движение может быть передано из любого одного направления в любое другое с помощью шнура и двух шкивов без изменения его скорости.

Если необходимо изменить скорость, воспользуйтесь любой из систем шкивов, описанных в ГЛАВЕ XV. может использоваться в дополнение к неподвижным шкивам.

Посредством колеса и оси любое непрерывное прямолинейное движение может быть совершено для создания другого в любом другом направлении и с любой другой скоростью. Уже объяснялось ([250](#)), что отношение скорости двигателя к скорости веса равно отношению диаметра колеса к диаметру оси. Таким образом, толщина оси регулируется в зависимости от размера колеса таким образом, чтобы их диаметры находились в том соотношении, которое существует между предполагаемыми скоростями, и одно условие задачи будет выполнено. Трос, намотанный на ось, может перемещаться с помощью одного или нескольких неподвижных шкивов в направлении одного из предполагаемых движений, в то время как трос, окружающий колесо, перемещается в направлении другого аналогичными средствами.

(315.) Посредством колеса и оси может совершаться непрерывное прямолинейное движение для создания непрерывного вращательного движения или *наоборот*. Если мощность подается с помощью троса, намотанного на колесо, то продолжающееся движение мощности по прямой линии приведет к вращательному движению машины. Опять же, если вес прилагается с помощью веревки, намотанной на ось, сила, имеющая вращательное движение, приложенная к колесу, приведет к продолжению подъема груза по прямой.

Непрерывные прямолинейные и вращательные движения могут создаваться друг для друга путем приведения зубчатого колеса в движение по прямолинейному стержню, называемому *рейкой*, с зубьями на его кромке. Такое устройство представлено на [рис. 159](#).

В некоторых случаях зубья колеса работают в звеньях цепи. Колесо тогда называется *тряпичным колесом*, [рис. 160](#).

Ремни, перевязи или веревки могут передавать вращение колесу за счет трения в канавке на его кромке.

Непрерывное прямолинейное движение обеспечивается непрерывным круговым движением в случае винта. Рычаг, вращающий винт, совершает непрерывное круговое движение, в то время как сам винт продвигается вперед с непрерывным прямолинейным движением.

Продолжающееся прямолинейное движение потока воды, воздействующего на колесо, приводит к продолжению кругового движения колеса, [рис. 93, 94, 95](#). Подобным образом продолжающееся прямолинейное движение ветра приводит к продолжительному круговому движению лопастей ветряной мельницы.

Краны для подъема и опускания тяжелых грузов преобразуют круговое движение двигателя в непрерывное прямолинейное движение груза.

(316.) Непрерывное круговое движение может приводить к возвратно-поступательному прямолинейному движению с помощью множества хитроумных приспособлений.

Возвратно-поступательное прямолинейное движение используется, когда тяжелые штампы необходимо поднять на определенную высоту и позволить им упасть на какой-либо предмет, расположенный под ними. Это может быть достигнуто с помощью колесных опор с загнутыми по краям зубьями, называемых *дворниками*. Штамповщик снабжен выступающим рычагом или штифтом, под который последовательно подводятся дворники при вращении колеса. При вращении колеса стеклоочиститель поднимает стампер до тех пор, пока его конец не пройдет мимо выступающего рычага стампера, после чего последний немедленно опускается под действием собственного веса. Затем он подхватывается следующим стеклоочистителем, и таким образом процесс продолжается.

Аналогичный эффект достигается, если колесо частично снабжено зубьями, а штамповщик имеет рейку, в которой работают эти зубья. Такое устройство представлено на [рис. 161](#).

Иногда необходимо, чтобы возвратно-поступательное прямолинейное движение совершалось с определенной изменяющейся скоростью в обоих направлениях. Это может быть выполнено с помощью машины, представленной на [рис. 162](#). Колесо на оси C равномерно вращается в направлении $AB \rightarrow D \rightarrow E$. Стержень mn перемещается по направляющим, которые позволяют ему подниматься и опускаться только перпендикулярно. Его конец m опирается на дорожку или канавку, выступающую из торца колеса и имеющую форму такой кривой, что при вращении колеса стержень mn должен попеременно перемещаться в противоположных направлениях по направляющим с требуемой скоростью. Способ изменения скорости будет зависеть от формы, приданной канавке или каналу, выступающему на поверхности колеса, и ему может быть придана такая форма, чтобы придать любое изменение движению стержня mn , которое может потребоваться для цели, для которой он должен применяться.

The *rose-engine* в токарном станке сконструирован по этому принципу. Он также используется в прядильном оборудовании.

Часто бывает необходимо, чтобы на стержень, которому сообщается возвратно-поступательное движение, воздействовала одинаковая сила в обоих направлениях. Для этого используется колесо, частично снабженное зубьями, действующее на две рейки, расположенные по разные стороны от него, и обе соединенные со стержнем, которому должно передаваться возвратно-поступательное движение. Такое устройство представлено на [рис. 163](#) и не нуждается в дополнительных пояснениях.

Другое приспособление для той же цели показано на [рис. 164](#), где A - колесо, вращаемое лебедкой H и соединенное со стержнем или балкой, перемещающейся в направляющих с помощью шарнира ab . Когда колесо A поворачивается лебедкой H , балка перемещается

между направляющими попеременно в противоположных направлениях, причем величина ее диапазона определяется длиной диаметра колеса. Такой аппарат используется для шлифования и полировки плоских поверхностей, а также встречается в шелкоткацких машинах.

Приспособление, примененное М. Зуредой в машине для прокалывания отверстий в коже, представлено на [рис. 165](#). Колесо Ab имеет по окружности зубья, форма которых может варьироваться в зависимости от обстоятельств, при которых оно должно применяться. Один конец стержня ab опирается на зубья колеса, на которое он прижимается пружиной на другом конце. Когда колесо вращается, оно сообщает этому стержню возвратно-поступательное прямолинейное движение.

Лейпольд применил этот механизм для перемещения поршней насосов.⁵ На вертикальной оси горизонтального гидравлического колеса закреплено другое горизонтальное колесо, снабженное семью зубьями на манер корончатого колеса ([263](#)). Эти зубья имеют форму наклонных плоскостей, промежутки между которыми равны длине плоскостей. Выступающие рычаги, прикрепленные к поршневым штокам, опираются на головку этого колеса; и, когда оно вращается, наклонные поверхности зубьев, проходя под рычагом, поднимают шток по принципу клина. Чтобы уменьшить препятствие, возникающее из-за трения, выступающие рычаги поршневых штоков снабжены роликами, которые скользят по зубьям колеса. За один оборот колеса каждый поршень совершает столько подъемов и спусков, сколько имеется зубьев.

(317.) Работа с колесом дает множество примеров непрерывного кругового движения вокруг одной оси, приводящего к непрерывному круговому движению вокруг другой. Если оси расположены в параллельных направлениях и не слишком далеко друг от друга, вращение может передаваться от одной к другой двумя цилиндрическими колесами ([263](#)); и относительные скорости могут определяться путем придания соответствующей пропорции диаметру колес.

Если требуется передать вращательное движение от одной оси к другой, параллельной ей, и на сколь угодно значительном расстоянии, то на практике это невозможно осуществить одними колесами, поскольку их диаметр был бы слишком велик. В этом случае по окружностям обоих колес натягивается ремень или цепь. Если они предназначены для поворота в одном направлении, планка располагается, как показано на [рис. 100](#); но если в противоположных направлениях, она перекрещивается, как показано на [рис. 101](#). В этом случае, как и в случае с зубчатыми колесами, относительные скорости определяются соотношением диаметров колес.

Если оси удалены друг от друга и не параллельны, трос, с помощью которого передается движение, должен быть пропущен через колеса с канавками или неподвижные шкивы, надлежащим образом размещенные между двумя осями.

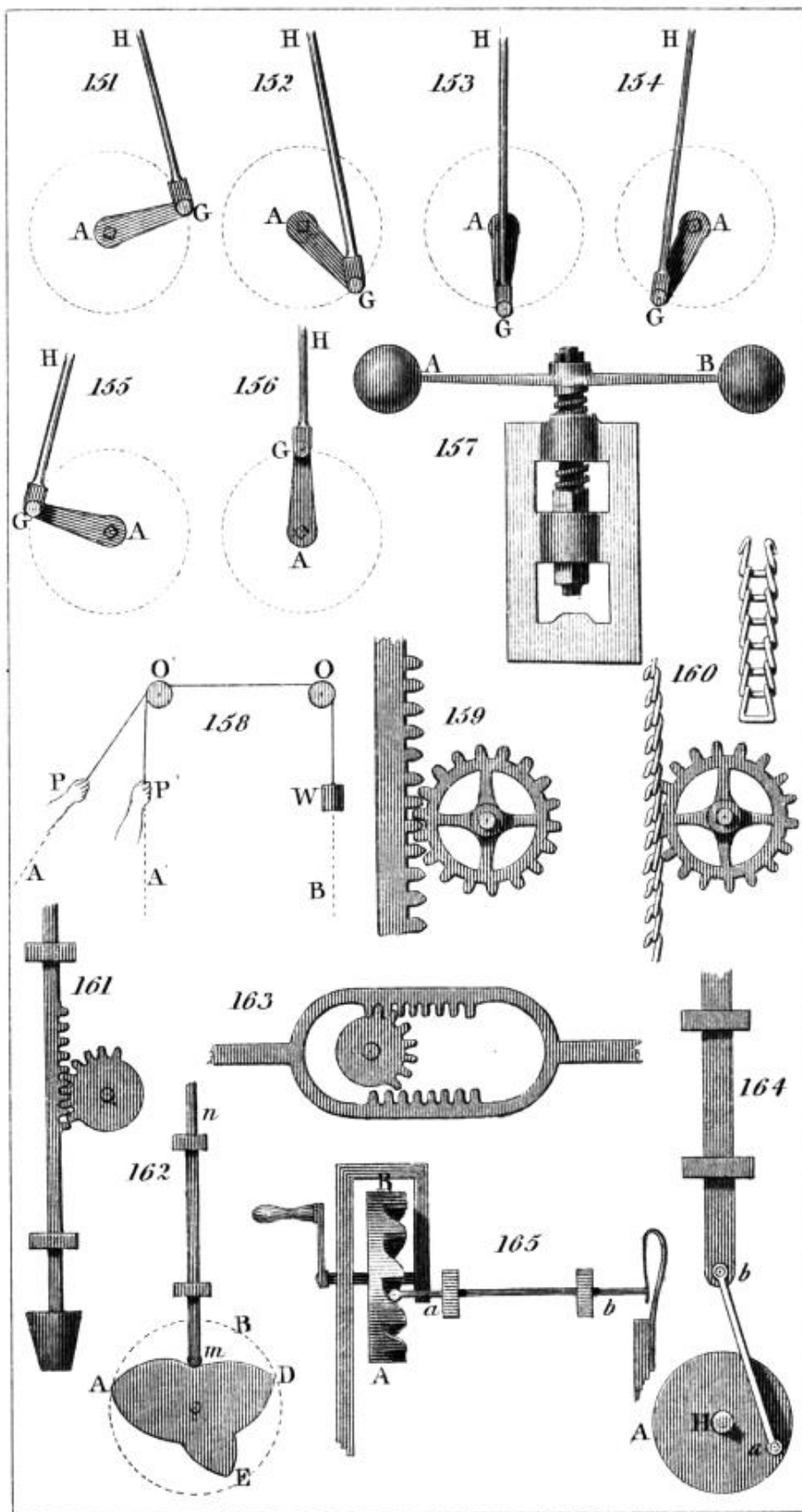
Может случиться так, что нагрузка на колесо, которому должно передаваться движение, слишком велика, чтобы можно было использовать ремень или веревку. В этом случае вал, проходящий от одной оси к другой и несущий два скошенных колеса ([263](#)), достигнет поставленной цели. Одно из этих скошенных колес размещено на валу рядом с колесом, от которого должно передаваться движение, и в соединении с ним, а другое - на его части

рядом с тем колесом, которому должно передаваться движение, и в соединении с ним, [рис. 166](#).

Способы передачи вращения с одной оси на другую, перпендикулярную ей, с помощью заводной головки и скошенных колес были объяснены в [\(263.\)](#).

Бесконечный винт [\(299.\)](#) - это машина, с помощью которой вращательное движение вокруг одной оси может передавать вращательное движение вокруг другой, перпендикулярной ей. Привод вращается вокруг оси, совпадающей с длиной винта, а ось колеса, приводимого в движение винтом, расположена под прямым углом к ней.

Ось, которой должно быть придано вращение или от которой оно должно быть взято, иногда меняется в своем положении. В таких случаях может быть использовано хитроумное приспособление, называемое *универсальным шарниром*, изобретенное знаменитым доктором Гуком. Два вала или оси Ab , [рис. 167](#), между которыми должно передаваться движение, заканчиваются полукругами, диаметры которых, Cd и Ef , зафиксированы в форме креста, их концы свободно перемещаются во втулках, размещенных на концах полукругов. Таким образом, пока центральная крестовина остается неподвижной, стержень A и его полукруглый конец могут вращаться вокруг Cd в качестве оси; а стержень B и его полукруглый конец могут вращаться вокруг Ef в качестве оси. Если заставить вал A вращаться без изменения его направления, точки C и D будут двигаться по окружности, центр которой находится в середине креста. Движение, приданное таким образом кресту, заставит точки E и f двигаться по другому кругу вокруг того же центра, и, следовательно, ось B будет вращаться.



Этот прибор не будет передавать движение, если угол под направлениями валов меньше 140° . В этом случае двойное соединение, как показано на [рис. 168](#), будет соответствовать назначению. Он состоит из четырех полукругов, соединенных двумя крестами, и его принцип действия такой же, как и в последнем случае.

Универсальные шарниры широко используются при регулировке положения больших телескопов, когда, пока наблюдатель продолжает смотреть в трубу, необходимо поворачивать бесконечные винты или колеса, оси которых недоступны.

Крестовина не является обязательной в универсальном шарнире. Обруч с четырьмя выступающими из него булавками в четырех точках, одинаково удаленных друг от друга, или разделяющий окружность обруча на четыре равные дуги, будет соответствовать назначению. Эти штифты расположены в выступах полукругов таким же образом, как и у креста.

Универсальный шарнир широко используется на хлопчатобумажных фабриках, где валы выносятся на значительное расстояние от первичного двигателя, и большое преимущество достигается за счет разделения их на удобные отрезки, соединенные шарниром такого типа.

(318.) При практическом применении машин часто бывает необходимо соединить деталь, совершающую непрерывное круговое движение, с другой деталью, совершающей возвратно-поступательное или попеременное движение, чтобы одна из них могла перемещать другую. Существует множество ухищрений, с помощью которых это может быть осуществлено.

Один из самых замечательных примеров этого представлен в конструкциях наручных часов. В этом случае, однако, едва ли можно со строгим основанием утверждать, что именно вращение опорного колеса ([266](#).) *передает* вибрацию балансирному колесу или маятнику. Эта вибрация вызывается, в одном случае, особой природой спиральной пружины, закрепленной на оси балансира, а в другом случае - силой тяжести маятника. Усилие только на опорном колесе *поддерживает* вибрацию и предотвращает ее затухание из-за трения и атмосферного сопротивления. Тем не менее, между двумя движущимися таким образом частями существует механическая связь, которая обычно приводится в соответствие с классом рассматриваемых сейчас приспособлений.

Балка, вибрирующая на оси и приводимая в движение поршнем паровой машины или любой другой силой, может передавать вращательное движение оси с помощью соединителя и кривошипа. Это устройство уже было описано в ([311](#).). Примером этого является каждая паровая машина, работающая на балке. Рабочая балка обычно располагается над двигателем, к одному концу которого прикреплен поршневой шток, в то время как шатун соединяет другой конец с кривошипом. Однако в лодочных двигателях такое положение было бы неудобным, поскольку требовало бы больше места, чем можно было бы легко сэкономить. Таким образом, поршневой шток в этих случаях соединен с концом балки длинными стержнями, и балка расположена рядом с двигателем и под ним. Использование маховика здесь также было бы нежелательным. Эффекта мертвых точек, описанного в ([311](#).), можно избежать без помощи мушки, поместив две рукоятки на вращающуюся ось и приводя их в действие двумя поршнями. Рукоятки расположены таким образом, что, когда одна из них находится в мертвой точке, другая находится в наиболее выгодном положении.

Колесо А, [рис. 169](#), снабженное стеклоочистителями, воздействующее на кувалду В, закрепленную в центре или оси С, за счет непрерывного вращательного движения придает молотку возвратно-поступательное движение, необходимое для целей, для которых оно применяется. Способ, которым это действует, должен быть очевиден при осмотре рисунка.

Диск токарного станка представляет собой очевидный пример вибрирующего кругового движения, производящего непрерывное круговое движение. Педаль воздействует на кривошип, который приводит в движение главное колесо, таким же образом, как уже описано в отношении рабочей балки и кривошипа в паровой машине.

С помощью следующего хитроумного механизма может быть создано альтернативное или вибрирующее усилие для передачи кругового движения непрерывно в одном и том же направлении. Пусть А В, [рис. 170](#), представляет собой ось, получающую попеременное движение от некоторой приложенной к ней силы, такой как качающийся груз. На этой оси закреплены два храповых колеса ([253](#).) *m* и *n*, зубья которых наклонены в противоположных направлениях. На нем также размещены два зубчатых колеса С и D, но расположены так, что они вращаются на оси с небольшим трением. Эти колеса снабжены двумя защелками *p*, *q*, которые входят в зубья храповых колес *m*, *n*, но расположены с противоположных сторон в соответствии с наклоном уже упомянутых зубьев. Действие этих защелок заключается в том, что если заставить ось вращаться в одном направлении, то одно из двух зубчатых колес всегда вынуждено (защелкой, *против* которой направлено движение) вращаться вместе с ней, в то время как другому разрешается оставаться неподвижным под действием любой силы, достаточно большой, чтобы преодолеть его трение о ось, на которую оно установлено. Колеса С и D оба входят в зацепление со скошенными зубьями ([263](#).) с колесом Е.

Согласно этому устройству, в каком бы направлении ни вращалась ось Аb, колесо Е будет постоянно вращаться в одном и том же направлении, и, следовательно, если ось Аb будет поворачиваться попеременно то в одну, то в другую сторону, колесо Е не изменит направление своего движения. Предположим, что ось Аb повернута против фиксатора *p*. Затем колесо С будет поворачиваться вместе с осью. Это приведет в движение колесо Е в том же направлении. Зубья на противоположной стороне колеса Е входят в зацепление с зубьями колеса D, последнее поворачивается на оси, при этом преодолевается трение, которое единственное препятствует его движению в этом направлении. Пусть теперь движение оси Аb будет обратным. Поскольку зубья храпового колеса *n* перемещаются относительно фиксатора *q*, колесо D будет вынуждено вращаться вместе с осью. Колесо Е будет приводиться в движение в том же направлении, что и раньше, а колесо С будет перемещаться по оси Аb и в направлении, противоположном движению оси, при этом трение преодолевается силой колеса Е. Таким образом, в то время как ось Аb поворачивается попеременно то в одну, то в другую сторону, колесо Е постоянно перемещается в одном и том же направлении.

Очевидно, что направление, в котором движется колесо Е, может быть изменено на обратное путем изменения положения храповых колес и защелок.

(319.) Часто бывает необходимо передать альтернативное круговое движение, подобное движению маятника, посредством альтернативного движения по прямой. Замечательный пример этого имеет место в паровой машине. Движущей силой в этой машине является давление пара, которое попеременно перемещает поршень из конца в конец в цилиндре. Усилие этого поршня передается рабочей балке прочным штоком, который проходит через

буртик на одном конце поршня. Поскольку необходимо, чтобы пар, находящийся в цилиндре, не выходил между штоком поршня и втулкой, через которую он проходит, и в то же время, чтобы он двигался как можно более свободно и оказывал как можно меньшее сопротивление, шток поворачивается таким образом, чтобы он был действительно цилиндрическим, и хорошо отполирован. Очевидно, что при этих обстоятельствах он не должен подвергаться каким-либо боковым или поперечным деформациям, которые могли бы согнуть его в ту или иную сторону цилиндра. Но конец балки, которому он сообщает движение, если бы он был соединен непосредственно со стержнем шарниром, тянул бы его попеременно то в одну, то в другую сторону, поскольку он движется по дуге окружности, центр которой находится в центре балки. Следовательно, необходимо придумать какой-нибудь способ соединения стержня и конца балки, чтобы в то время как один должен подниматься и опускаться по прямой, другой мог двигаться по дуге окружности.

Метод, который в первую очередь напрашивается для достижения этой цели, заключается в создании арочной головки на конце балки, как показано на [рис. 171](#). Пусть С - центр, на который опирается балка, и пусть Вd - арка, прикрепленная к концу балки, являющаяся частью круга, имеющего С в качестве центра. К самой высокой точке В арки прикреплена цепь, которая проходит по лицевой стороне арки Ва, а другой конец которой прикреплен к штоку поршня. При этих обстоятельствах очевидно, что, когда сила пара толкает поршень вниз, цепь Ра В потянет конец балки вниз и, следовательно, поднимет другой конец.

Когда паровая машина используется для определенных целей, таких как перекачка, этого устройства достаточно. В этом случае поршень не выталкивается вверх давлением пара. Во время подъема он не подвергается действию какой-либо силы пара, и другой конец балки опускается под действием веса насосных штоков, притягивающих поршень на противоположном конце А к верхней части цилиндра. Таким образом, машина фактически пассивна во время подъема поршня и проявляет свою мощность только во время спуска.

Однако, если машина применяется для целей, в которых необходимо постоянное действие движущей силы, как это всегда бывает на производстве, усилие поршня должно приводить балку в движение как при подъеме, так и при опускании. Только что описанное устройство не может этого осуществить; ибо, хотя цепь способна передавать любую силу, с помощью которой ее концы тянутся в противоположных направлениях, все же из-за своей гибкости она неспособна передавать силу, которая приводит один ее конец в движение по направлению к другому. В одном случае поршень сначала *тянет* вниз балку, а затем балка *тянет* вверх поршень. Цепь, поскольку она нерастяжима, вполне способна выполнять оба этих действия; и, будучи гибкой, она прикрепляется к дугообразной головке балки таким образом, чтобы постоянно поддерживать направление своего усилия на поршень в одной и той же прямой линии. Но когда поршень воздействует на балку обоими способами, тянет ее вниз и толкает вверх, цепь становится неэффективной, поскольку из-за своей гибкости не способна на последнее действие.

Проблему можно было бы решить, увеличив длину поршневого штока так, чтобы его оконечность находилась над балкой, и используя две цепи; одна соединяет самую высокую точку штока с самой низкой точкой дугообразной головки, а другая соединяет самую высокую точку дугообразной головки с точкой на штоке ниже точки, которая встречается с дугообразной головкой, когда поршень находится в верхней части цилиндра, [рис. 172](#).

Требуемое соединение также может быть выполнено путем оснащения дугообразной головки зубьями, [рис. 173](#) и заделки штока поршня в рейку. В случаях, когда, как в паровой машине, важна плавность хода, этот метод нежелателен; и при любых обстоятельствах такое устройство подвержено быстрому износу.

Разработанный Уаттом метод связи движения поршня с движением балки является одним из самых остроумных и элегантных решений, когда-либо предложенных для решения механической задачи. Он представил движение двух прямых стержней Ab , Cd , [рис. 174](#), движущихся по центрам или осям поворота A и C , так что концы B и D будут двигаться по дугам окружностей, центры которых находятся в точках A и C . Концы B и D этих стержней он задумал соединить с третьим стержнем Bd , соединенным с ними шарнирами, на которых он мог свободно поворачиваться. Системе соединенных таким образом стержней сообщим попеременное движение центров A и C : точки B и D будут перемещаться вверх и вниз по дугам, обозначенным пунктирными линиями, но средняя точка P соединительного стержня Bd будет перемещаться вверх и вниз без какого-либо заметного отклонения от прямой линии.

Демонстративное доказательство этого потребовало бы некоторого сложного математического исследования. Однако это может быть в некоторой степени очевидно из рассуждений более свободного и популярного характера. Когда точка B поднимается к E , она также отводится вправо. В то же время другой конец D стержня Bd поднимается до E' и отводится в сторону влево. Таким образом, концы стержня Bd одновременно одинаково вытягиваются в противоположные стороны, и его средняя точка P не будет отклоняться в сторону и будет двигаться прямо вверх. С другой стороны, если B переместить вниз на F , он будет нарисован сбоку вправо, в то время как D , перемещенный на F' , будет нарисован слева. Следовательно, как и прежде, средняя точка P не имеет бокового отклонения, а просто опускается. Таким образом, по мере того, как конечности B и D движутся вверх и вниз по кругам, средняя точка P движется вверх и вниз по прямой.⁶

Применение этого геометрического принципа в паровой машине демонстрирует большую изобретательность. Одно и то же плечо балки обычно приводит в движение два поршня: поршень цилиндра и поршень *воздушного насоса*. Устройство представлено на плече балки на [рис. 175](#). Луч движется попеременно вверх и вниз вокруг своей оси A . Таким образом, каждая его точка описывает часть окружности, центром которой является A . Пусть B - точка, разделяющая рычаг Ag на две равные части Ab и Bg ; и пусть Cd - прямой стержень, равный по длине Gb и закрепленный на центре или оси C , на которой он может свободно вращаться. Конец D этого стержня соединен прямой перекладкой с точкой B посредством шарниров, на которых стержень Bd свободно вращается. Если теперь предположить, что балка поднимается и опускается попеременно, точки B и D будут перемещаться вверх и вниз по дугам окружности, и, как уже объяснялось относительно точек Bd , [рис. 174](#), средняя точка P соединительного стержня Bd будет перемещаться вверх и вниз без бокового отклонения. К этой точке прикреплен один из поршневых штоков, подлежащих обработке.

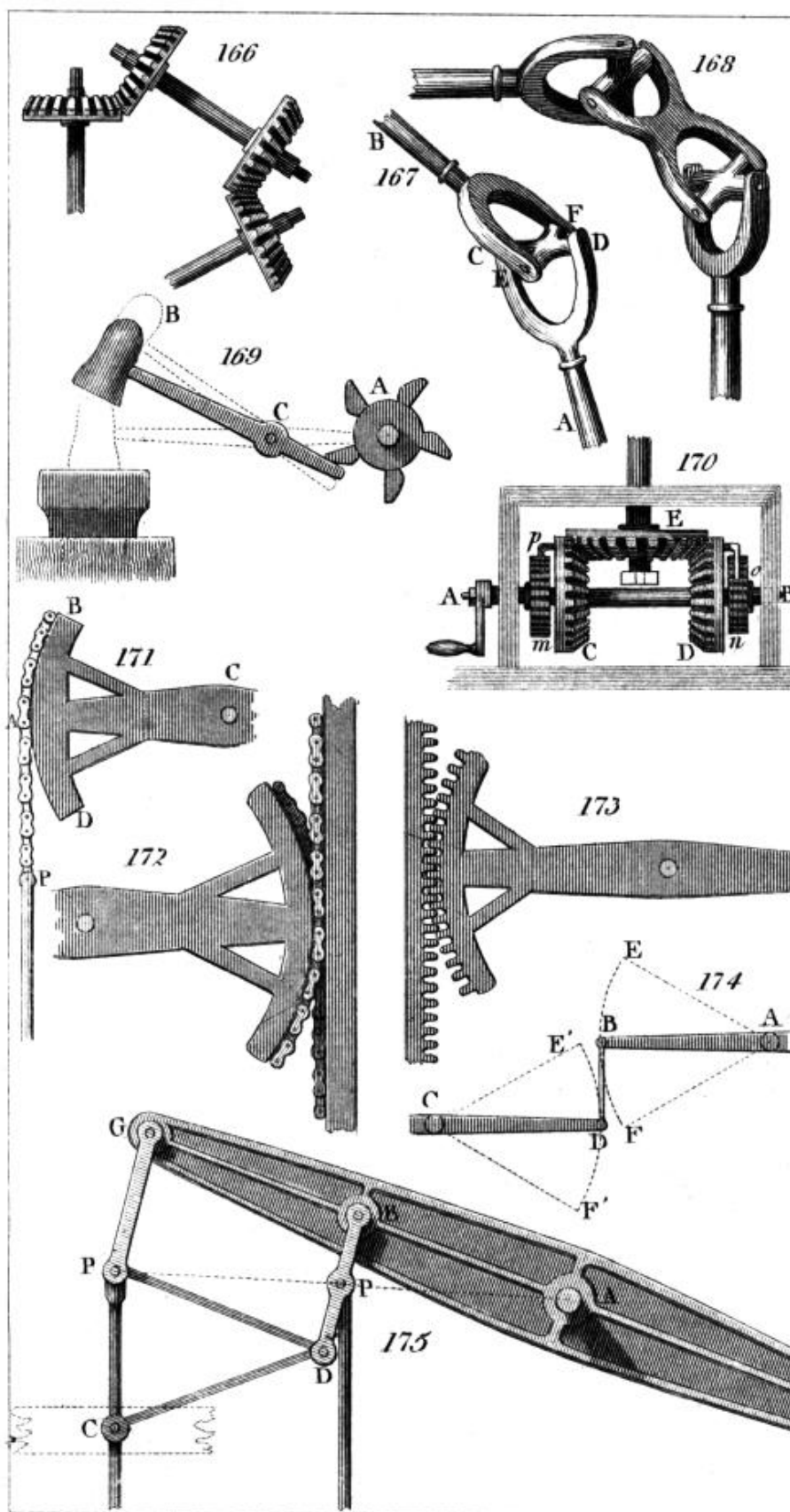
Чтобы понять метод работы другого поршня, представим себе стержень Gr' , равный по длине Bd , который крепится к концу G балки с помощью оси, на которой он свободно перемещается; и пусть его конец P' будет соединен с D другим стержнем $P'D$, равным по длине Gb и выступающим в точках P' и D . Шток поршня цилиндра прикреплен к точке P' , и

эта точка совершает движение, в точности аналогичное движению точки P , без какого-либо бокового отклонения, но с диапазоном в перпендикулярном направлении в два раза большим. Это станет очевидным, если представить прямую линию, проведенную от центра A луча к P' , которая также будет проходить через P . Поскольку точка G P' всегда параллельна точке B P , очевидно, что треугольник $P'GA$ всегда подобен точке PBA и имеет свои стороны и углы, расположенные аналогичным образом, но каждая из этих сторон в два раза больше соответствующих сторон другого треугольника. Следовательно, точка P' должна подвергаться тем же изменениям положения, что и точка P , с той лишь разницей, что за то же время она перемещается на пространство вдвое большей величины. Фактически, линия, проведенная через P' , такая же, как и линия, проведенная через P , но в масштабе в два раза большем. Это приспособление обычно называют *параллельным движением*, но это же название обычно применяется ко всем приспособлениям, с помощью которых совершается круговое движение для получения прямолинейного.

ГЛАВА XIX.

О ТРЕНИИ И ЖЕСТКОСТИ КАНАТОВ.

(320.) С целью упрощения элементарной теории машин рассмотрение нескольких механических эффектов, имеющих большое практическое значение, было отложено, и внимание изучающего было направлено исключительно на способ, которым изменяется движущая сила при передаче на сопротивление независимо от таких эффектов. Машина была описана как инструмент, с помощью которого движущийся принцип, неприменимый в его существующем состоянии к цели, для которой он требуется, может быть изменен либо по его скорости, либо по направлению, либо по какому-либо другому характеру, чтобы быть приспособленным к этой цели. Но при выполнении этого несколько частей машины рассматривались как обладающие в совершенной степени качествами, которыми они обладают лишь в несовершенной степени; и соответственно выводы, к которым нас подводят такие рассуждения, заражены ошибками, количество которых будет зависеть от степени, в которой машине не хватает совершенства в тех качествах, которые теоретически ей приписываются.



Из нескольких частей машины одни предназначены для перемещения, в то время как другие неподвижны; и из тех, которые движутся, некоторые имеют движения, отличающиеся по количеству и направлению от движений других. Несколько деталей, как неподвижных, так и подвижных, подвергаются различным деформациям и давлениям, которым они призваны противостоять. Эти силы варьируются не только в зависимости от нагрузки, которую приходится преодолевать машине, но и в зависимости от специфической формы и конструкции самой машины. Во время работы поверхности подвижных деталей перемещаются, непосредственно соприкасаясь с поверхностями либо неподвижных деталей, либо деталей, совершающих другие движения. Если бы эти поверхности были идеально гладкими или отполированными, а несколько деталей, подверженных деформациям, обладали совершенной негибкостью и бесконечной прочностью, тогда воздействие механизмов можно было бы практически исследовать с помощью уже объясненных принципов. Но материалы, из которых изготовлена каждая машина, обладают ограниченной прочностью, и поэтому нагрузка, которая на нее оказывается, должна быть соответственно ограничена, иначе она может деформироваться при изгибе или даже разрушаться в результате разрушения тех частей, которые подвергаются чрезмерному напряжению. Поверхности подвижных частей и те поверхности, с которыми они соприкасаются, на практике не могут быть сделаны настолько гладкими, чтобы такие шероховатости и неровности оставались настолько ощутимыми, чтобы препятствовать движению. Для преодоления такого препятствия требуется немалая часть движущей силы. Таким образом, эта деталь перехватывается до ее прибытия в рабочую точку, и сопротивление, которое должно быть окончательно преодолено, лишается ее. Свойство, таким образом, зависящее от несовершенной гладкости поверхностей и препятствующее движению тел, поверхности которых находятся в непосредственном контакте, называется *трением*. Прежде чем мы сможем составить справедливую оценку воздействия механизмов, необходимо определить силу, теряемую этим препятствием, и законы, которые при различных обстоятельствах регулируют эту потерю.

Когда веревка используется для формирования какой-либо части машины, до сих пор считалось, что она обладает идеальной гибкостью. На практике это не так; и отсутствие идеальной гибкости, которая называется *жесткостью*, требует определенного усилия, необходимого для того, чтобы натянуть шнур или веревку на поверхность оси или канавки колеса. Таким образом, во время движения каната другая его часть должна постоянно изгибаться, и сила, затрачиваемая на создание необходимого изгиба, должна быть получена из движущей силы и, таким образом, перехвачена на пути к рабочей точке. При расчете последствий использования канатов необходимо должным образом учитывать эту пустую трату энергии; и поэтому необходимо изучить законы, управляющие изгибом недостаточно гибких канатов, и то, как они влияют на машины, в которых обычно используются канаты.

Таким образом, для завершения элементарной теории механизмов мы предлагаем в настоящей и следующей главах объяснить основные законы, определяющие влияние трения, жесткость канатов и прочность материалов.

(321.) Если бы горизонтальная плоская поверхность была идеально гладкой и без малейших неровностей, и на нее поместили бы тело, имеющее плоскую поверхность, также идеально гладкую, любая сила, приложенная к последнему, привела бы его в движение, и это движение продолжалось бы без ослабления до тех пор, пока тело оставалось бы на гладкой

горизонтальной поверхности. Но если бы эта поверхность, вместо того чтобы быть повсюду идеально ровной, имела в определенных местах небольшие выступающие возвышенности, потребовалось бы определенное усилие, чтобы перенести движущееся тело по ним, и последовало бы пропорциональное уменьшение скорости его движения. Таким образом, если бы такие возвышения встречались часто, каждое из них лишало бы тело части его скорости, так что между этим и следующим оно двигалось бы с меньшей скоростью, чем между тем же самым и предыдущим. Поскольку это уменьшение продолжается при последовательном столкновении тела с достаточным количеством таких возвышенностей, скорость в конце концов уменьшилась бы настолько, что у тела не было бы достаточной силы, чтобы перенести его на следующую возвышенность, и его движение, таким образом, полностью прекратилось бы.

Теперь, вместо того чтобы выступы находились на значительном расстоянии друг от друга, предположим, что они соприкасаются и распространяются во всех направлениях по горизонтальной плоскости, а также предположим, что соответствующие выступы находятся на поверхности движущегося тела; эти выступы, непрестанно сталкиваясь друг с другом, будут постоянно препятствовать движению тела и постепенно уменьшать его скорость, пока оно не перейдет в состояние покоя.

Такова причина трения. Величина этой силы сопротивления увеличивается с увеличением величины этих неровностей или шероховатости поверхностей; но это зависит не только от этого. Поверхности остаются теми же, небольшое размышление о только что использованном методе иллюстрации покажет, что величина трения также должна зависеть от силы, с которой поверхности, движущиеся одна относительно другой, прижимаются друг к другу. Очевидно, что по мере увеличения веса тела, которое должно двигаться в горизонтальной плоскости, потребуется пропорционально большая сила, чтобы переносить его через препятствия, с которыми оно сталкивается, и, следовательно, оно быстрее потеряет свою скорость и будет приведено в состояние покоя.

(322.) Таким образом, мы могли бы с вероятностью предсказать, что точное экспериментальное исследование подтвердит истинность того, что сопротивление трению зависит одновременно от шероховатости поверхностей и силы давления. Когда поверхности одинаковы, двойное давление приведет к удвоению силы трения, тройное давление - к утроению силы трения и так далее.

Однако эксперимент также дает результат, которого, по крайней мере на первый взгляд, нельзя было ожидать, исходя из принятого нами способа иллюстрации. Обнаружено, что сопротивление, возникающее в результате трения, вообще не зависит от величины поверхности соприкосновения; но при условии, что природа поверхностей и величина давления остаются неизменными, это сопротивление будет одинаковым, независимо от того, велики или малы поверхности, которые перемещаются одна по другой. Таким образом, если движущееся тело представляет собой плоский деревянный брусок, поверхность которого равна квадратному футу по величине, а край которого не превышает квадратного дюйма, то оно будет подвергаться одинаковому трению, независимо от того, движется ли оно по своей широкой поверхности или по своему узкому краю. Если мы рассмотрим влияние давления в каждом конкретном случае, мы сможем понять, почему это должно быть так. Предположим, что вес блока равен 144 унциям. Когда он лежит лицевой стороной, давление в эту величину воздействует на поверхность площадью 144 квадратных дюйма,

так что на каждый квадратный дюйм действует давление в одну унцию. Следовательно, общее сопротивление, возникающее в результате трения, будет в 144 раза больше сопротивления, которое создавала бы поверхность площадью в один квадратный дюйм под давлением в одну унцию. Теперь предположим, что блок помещен на его край, и тогда на поверхность, равную одному квадратному дюйму, оказывается давление в 144 унции. Но уже было показано, что при одинаковой поверхности трение должно увеличиваться пропорционально давлению. Следовательно, мы заключаем, что трение, возникающее в данном случае, в 144 раза превышает трение, которое могло бы возникнуть при давлении в одну унцию, действующем на один квадратный дюйм поверхности, что является тем же сопротивлением, которому, как было доказано, подвергается тело, лежащее на поверхности.

Эти два закона, согласно которым трение не зависит от величины поверхности и пропорционально давлению при одинаковом качестве поверхностей, полезны на практике и в целом верны. Однако в самых крайних случаях они ошибаются. Когда давление очень велико по отношению к поверхности, трение несколько *меньше*, чем это было бы по этим законам; а когда оно очень мало по отношению к поверхности, оно несколько *больше*.

(323.) Существуют два метода экспериментального установления законов трения, которые были только что объяснены.

Первый. Поскольку поверхности, между которыми должно определяться трение, должны быть сделаны идеально плоскими, пусть одна из них будет закреплена в горизонтальном положении на столе Tt' , [рис. 176](#); а другая пусть будет прикреплена ко дну ящика Bc , приспособленного для размещения грузов, чтобы изменять давление. Пусть шелковый шнур SP , прикрепленный к коробке, протянут параллельно столу через колесо в точке P , и пусть к нему будет подвешено блюдо D . Если бы между поверхностями не было трения, то самый маленький груз, приложенный к шнуру, тянул бы коробку в направлении P с постоянно увеличивающейся скоростью. Но трение, которое всегда существует, прерывает этот эффект, и небольшой вес может воздействовать на струну, вообще не перемещая коробку. Пусть в чашу D будут помещены грузы до тех пор, пока не будет получено достаточное усилие для преодоления трения без придания коробке ускоренного движения. Такой вес эквивалентен величине трения.

Поскольку величина веса коробки была определена ранее, пусть теперь этот вес увеличится вдвое, поместив в коробку дополнительные грузы. Давление, таким образом, удвоится, и окажется, что вес тарелки D и ее груза, который раньше был способен преодолевать трение, теперь совершенно неадекватен ему. Пусть в чашу поместят дополнительные грузы до тех пор, пока трение не будет устранено, как и раньше, и будет замечено, что весь вес, необходимый для достижения этого эффекта, ровно вдвое превышает вес, который производил его в первом случае. Таким образом, оказывается, что удвоенное давление вызывает удвоенное трение; и аналогичным образом можно доказать, что любое предлагаемое увеличение или уменьшение давления будет сопровождаться пропорциональным изменением величины трения.

Второй. Пусть одна из поверхностей прикреплена к плоской плоскости Ab , [рис. 177](#), которая может располагаться под любым углом к горизонтальной плоскости Bc , а другая поверхность, как и прежде, прикреплена к ящику, приспособленному для размещения грузов. Когда коробку устанавливают на плоскость, пусть последняя будет немного приподнята. Тенденция ящика опускаться на AB будет иметь такое же отношение ко всему

его весу, какое перпендикуляр AE имеет к длине плоскости AB (286.). Таким образом, если длина AB равна 36 дюймам, а высота AE равна трем дюймам, что составляет двенадцатую часть длины, то тенденция веса перемещаться вниз по плоскости равна двенадцатой части всей его величины. Если бы вес составлял двенадцать унций, а поверхности были бы идеально гладкими, потребовалось бы усилие в одну унцию, действующее на плоскость, чтобы предотвратить падение груза.

В этом случае давление на плоскость также будет представлено длиной основания BE (286.), то есть оно будет относиться ко всему весу в той же пропорции, в какой BE относится к BA . Относительные величины веса, склонность к опусканию и давление всегда будут проявляться в относительных длинах AB , AE и BE .

Исходя из этого, пусть высота плоскости AB постепенно увеличивается до тех пор, пока тенденция веса к опусканию просто не преодолет трение, но не настолько, чтобы позволить ящику опускаться с ускоренной скоростью. Доля всего веса, который затем воздействует вниз по плоскости, будет найдена путем измерения высоты AE , а давление будет определено путем измерения основания BE . Теперь увеличим вес ящика, и окажется, что для преодоления трения необходима та же высота; и эта высота не претерпит никаких изменений, как бы ни менялись давление или величина соприкасающихся поверхностей.

Следовательно, поскольку во всех этих случаях высота AE и основание BE остаются неизменными, из этого следует, что соотношение между трением и давлением остается неизменным.

(324.) Закон о том, что трение пропорционально давлению, был подвергнут сомнению покойным профессором Винсом из Кембриджа, который из серии экспериментов вывел, что, хотя трение увеличивается с увеличением давления, все же оно увеличивается в несколько меньшей пропорции; и из этого следует, что изменение поверхности контакта должно оказывать некоторое влияние на величину трения. Однако закон, как мы его объяснили, достаточно близок к истине для большинства практических целей.

(325.) Существует несколько обстоятельств, касающихся качества поверхностей, которые оказывают важное влияние на величину трения и на которые здесь следует обратить внимание.

Это сопротивление различно для поверхностей из разных материалов. Когда речь идет о поверхностях из недавно обструганного дерева, оно составляет примерно половину давления, но различается для разных пород древесины. Трение металлических поверхностей составляет примерно четвертую часть давления.

В целом трение между поверхностями тел разных видов меньше, чем между телами того же вида. Таким образом, между деревом и металлом трение составляет примерно пятую часть давления.

Очевидно, что чем более гладкие поверхности, тем меньше будет трение. По этой причине трение поверхностей при первом соприкосновении часто больше, чем после того, как их истирание продолжалось в течение определенного времени, поскольку этот процесс имеет тенденцию удалять и стирать те мельчайшие неровности и выступы, от которых зависит трение. Но этому есть предел, и после определенного количества истирания трение

перестает уменьшаться. Недавно обструганные деревянные поверхности сначала имеют степень трения, равную половине общего давления, но после того, как они изнашиваются в результате истирания, она снижается до трети.

Если контактирующие поверхности расположены зернами в одном направлении, трение будет больше, чем при пересечении зерен друг с другом.

Смазывание поверхностей маслянистым веществом уменьшает трение, вероятно, за счет заполнения полостей между мельчайшими выступами, которые создают трение.

Когда поверхности впервые соприкасаются, трение меньше, чем когда они некоторое время находятся в таком состоянии; это подтверждается наблюдением за силой, которая в каждом случае необходима для перемещения одной поверхности относительно другой, причем эта сила меньше, если приложить ее в первый момент соприкосновения, чем когда соприкосновение продолжается. Однако у этого есть предел. Существует определенное время, разное для разных веществ, в течение которого это сопротивление достигает наибольшей величины. На поверхностях из дерева это происходит примерно за две минуты; на металлах это время незаметно сокращается; и когда поверхность из дерева накладывается на поверхность из металла, оно продолжает увеличиваться в течение нескольких дней. Предел больше, когда поверхности велики и принадлежат веществам разных видов.

Скорость, с которой поверхности соприкасаются друг с другом, оказывает лишь незначительное влияние на трение.

(326.) Существует несколько способов, с помощью которых тела могут перемещаться друг относительно друга, при этом трение будет производить различные эффекты. Основными из них являются, во-первых, случай, когда одно тело *скользит* по другому; во-вторых, когда тело, имеющее круглую форму, *накатывается* на другое; и, в-третьих, когда ось вращается внутри полого цилиндра или полый цилиндр вращается вокруг оси.

При одинаковой величине давления и одинаковом качестве поверхности величина трения наибольшая в первом случае и наименьшая во втором. Трение во втором случае также зависит от диаметра тела, которое катится, и невелико пропорционально тому, насколько этот диаметр велик. Таким образом, коляске с большими колесами меньше мешает трение о дорогу, чем коляске с маленькими колесами.

В третьем случае рычаг колеса помогает мощности преодолевать трение. Пусть [на рис. 178.](#) изображена секция колеса и оси; пусть С - центр оси, а Ве - полый цилиндр в ступице колеса, в который вставлена ось. Если В является частью, на которую давит ось, и колесо вращается в направлении Ndm, трение будет действовать в точке В в направлении Vf и с помощью рычага В С. Мощность противодействует этому в точке D в направлении Da и с помощью рычага D С. Следовательно, очевидно, что, поскольку Dc больше, чем Bc, в той же пропорции мощность воздействует с механическим преимуществом на трение.

(327.) Приспособления для уменьшения воздействия трения зависят от только что объясненных свойств, движение качения в максимально возможной степени заменяется движением скольжения; а там, где движение качения невозможно применить, используется движение колеса вокруг своей оси. В некоторых случаях оба эти ходатайства объединяются.

Если тяжелый груз тянуть по плоскости наподобие салазок, движение будет представлять собой скольжение, то есть такое движение, которое сопровождается наибольшим трением; но если груз поместить на цилиндрические ролики, характер движения изменится и станет таким, при котором трение будет наименьшим. Таким образом, большие каменные блоки или тяжелые деревянные балки, для перемещения которых по ровной дороге потребовалась бы огромная мощность, легко продвигаются, если под них подложить катки.

Когда необходимо перемещать очень тяжелые грузы по небольшим пространствам, этот метод используется с пользой; но когда требуется транспортировать грузы на значительные расстояния, процесс неудобен и медленен из-за необходимости постоянной замены роликов перед грузом, поскольку они отстают при его постепенном продвижении.

Колеса тележек можно рассматривать как ролики, которые постоянно перемещаются вперед вместе с грузом. В дополнение к трению, возникающему при движении качения по дороге, они, правда, испытывают трение оси в ступице; но, с другой стороны, они свободны от трения роликов о нижнюю поверхность груза или о тележку, в которой груз перевозится. Преимущества колесных тележек в уменьшении воздействия трения иногда объясняют медленностью, с которой ось перемещается внутри коробки, по сравнению со скоростью, с которой колесо перемещается по дороге; но это ошибочно. Величина трения ни в коем случае существенно не зависит от скорости движения, но в наименьшей степени это происходит при рассматриваемом здесь конкретном виде движения.

В определенных случаях, когда очень важно устранить последствия трения, используется приспособление, называемое *фрикционными колесами*, или фрикционными роликами. Ось фрикционного колеса, вместо того чтобы вращаться внутри неподвижного полого цилиндра, опирается на края колес, которые вращаются вместе с ним; таким образом, вид движения становится таким, при котором трение является наименьшим.

Пусть AB и DC , [рис. 179](#), представляют собой два колеса, вращающихся на шарнирах Pq с как можно меньшим трением и расположенных так, чтобы ось O третьего колеса Ef могла находиться между их краями. Когда колесо Ef вращается, ось O , вместо того чтобы шлифовать своей поверхностью поверхность, на которую она давит, увлекает эту поверхность за собой, заставляя вращаться колеса Ab , Cd .

В колесных каретах неровности дороги легче преодолеваются большими колесами, чем маленькими. Причина этого отчасти кроется в том, что большие колеса не так склонны проваливаться в ямы, как маленькие, но в большей степени в том, что при преодолении препятствий нагрузка увеличивается менее резко. Это будет легко понять, наблюдая за кривыми на [рис. 180](#), которые представляют высоту оси в каждом конкретном случае.

(328.) Если бы каретка могла двигаться по дороге без трения, наиболее выгодное направление, в котором можно было бы приложить силу для ее перемещения, было бы параллельно дороге. Однако, когда движению препятствует трение, лучше, чтобы линия тяги была наклонена к дороге, чтобы тяговое усилие могло быть израсходовано частично на уменьшение давления на дорогу, а частично на продвижение груза.

Пусть W , [рис. 181](#), - груз, который необходимо перемещать по плоской поверхности AB . Если тяговое усилие приложить в направлении Cd , параллельном плоскости Ab , то оно должно будет преодолеть трение, создаваемое давлением всего веса груза на плоскость; но если оно будет наклонено вверх в направлении Se , это будет эквивалентно двум силам, выраженным

(74.) через C_g и C_f . Деталь C_g снижает давление тележки на дорогу и, следовательно, в той же пропорции уменьшает трение. Деталь C_f перемещает нагрузку по плоскости. Поскольку C_f меньше, чем C_{e1} и C_d , общая движущая сила, очевидно, что часть силы тяги теряется из-за этого наклона; но, с другой стороны, часть противодействующего сопротивления также устраняется. Если последнее превысит первое, преимущество будет получено за счет уклонения; но если первое превысит последнее, сила будет потеряна.

С помощью математических рассуждений, основанных на этих соображениях, доказано, что наилучший угол наклона - это именно тот наклон, который следует придать дороге для того, чтобы экипаж мог двигаться самостоятельно. Этот наклон иногда называют *углом покоя*, и это тот угол, который определяет соотношение трения к давлению во втором методе, объясненном в (323.). Чем неровнее дорога, тем больше будет этот угол; и отсюда следует, что на плохих дорогах наклон следов к дороге должен быть больше, чем на хороших. На ровной, посыпанной щебнем дороге даже небольшой уклон может привести к тому, что карета покатится под действием собственного веса: следовательно, в этом случае рельсы должны быть почти параллельны дороге.

На железных дорогах по аналогичным причинам линия тяги должна быть параллельна дороге или почти параллельна ей.

(329.) Когда веревки или канаты являются частью механизмов, последствия их недостаточной гибкости в определенной степени компенсируются изгибом их по канавкам колес. Но хотя это настолько уменьшает эти эффекты, что делает канаты практически полезными, все же при расчете мощности механизмов необходимо учитывать некоторые последствия жесткости канатов, которые даже этими средствами не устраняются.

Чтобы объяснить, каким образом жесткость каната влияет на работу машины, мы предположим, что она согнута над колесом и натянута грузами A и B , [рис. 182](#), на своих концах. Поскольку веса A и B равны и действуют на точки C и D противоположно, колесо уравнивается. Если к грузу A добавить дополнительный вес, он преодолеет сопротивление B и повернет колесо в направлении $D E$. Теперь, на данный момент, давайте предположим, что веревка совершенно негибкая; колесо и грузы будут повернуты в положение, представленное на [рис. 183](#). Рычаг, с помощью которого действует A , будет уменьшен и станет O_f , поскольку был до O_c ; и рычаг, с помощью которого действует B , будет увеличен до O_g , поскольку был до O_d .

Но веревка, не являющаяся негибкой, частично поддастся воздействию грузов A и B , и части $A C$ и $B D$ будут согнуты в формы, представленные на [рис. 184](#). Форма изгиба, которую принимает канат с каждой стороны колеса, по-прежнему такова, что опускающийся груз A работает с уменьшенным рычагом F_o , в то время как поднимающийся груз сопротивляется ему с увеличенным рычагом $G O$. Таким образом, из-за жесткости троса теряется столько движущей силы, сколько необходимо для компенсации этого неблагоприятного изменения мощности машины.

ГЛАВА XX.

О ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ.

(330.) ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ исследованиям законов, регулирующих прочность твердых тел, или их способности противостоять силам, по-разному применяемым для их разрыва, препятствуют практические трудности, природа и масштабы которых настолько обескураживают, что немногие отваживаются столкнуться с ними вообще, и еще меньшему числу хватает стойкости упорствовать до тех пор, пока не будет получен какой-либо результат, показывающий общий закон. Эти трудности возникают отчасти из-за больших усилий, которые необходимо приложить, но в большей степени из-за специфической природы объектов этих экспериментов. Цель, на которую должно быть направлено такое исследование, - это разработка *общего закона*; то есть такого правила, которое строго соблюдалось бы, если бы материалы, прочность которых является объектом исследования, были совершенно однородны по своей текстуре и не допускали случайных неравенств. По мере того, как эти неравенства встречаются часто, эксперименты необходимо умножать, чтобы длинное среднее значение могло охватывать случаи, различающиеся по обоим крайним значениям, чтобы исключить влияние друг друга на конечный результат.

Материалы, из которых состоят конструкции и произведения искусства, подвержены столь многочисленным и столь значительным неравенствам текстуры, что любое правило, которое может быть выведено, даже с помощью самой обширной серии экспериментов, должно рассматриваться как средний результат, из которого отдельные примеры будут отличаться в такой большой степени, что при его практическом применении следует соблюдать большую, чем обычно, осторожность. Детали этого предмета в большей степени относятся к инженерному делу, чем к элементам механики. Тем не менее, общее представление о наиболее важных принципах, которые были установлены в отношении прочности материалов, не будет лишним в этом трактате.

Кусок твердого вещества может подвергаться действию силы, стремящейся разделить его части несколькими способами; основными из которых являются:

1. К *прямому натягиванию*, например, когда веревка или провод натягивается под действием груза. Когда стяжная балка сопротивляется разделению сторон конструкции и т.д.
2. К *прямому давлению или толчку*, например, когда груз опирается на столб.
3. До *поперечной деформации*, как при нажатии грузами на концах рычага на точку опоры.

(331.) Если твердое тело подвергается воздействию силы, которая тянет его в направлении его длины, имея тенденцию тянуть его концы в противоположных направлениях, его прочность или способность сопротивляться такой силе пропорциональна величине его поперечного сечения. Таким образом, предположим, что квадратный стержень из металла Ab, [рис. 185](#), шириной и толщиной в один дюйм, тянут с усилием в направлении Ab, и что определенное усилие оказывается достаточным для его разрыва; стержню из того же

металла вдвое большей ширины и такой же толщины потребуется удвоенное усилие, чтобы сломать его; стержню из того же металла утроенной ширины и такой же толщины потребуется утроенное усилие, чтобы сломать его, и так далее.

Причина этого очевидна. Стержень двойной или тройной толщины в этом случае эквивалентен двум или трем равным и одинаковым стержням, которые одинаково и по отдельности сопротивляются вытягивающему усилию и, следовательно, обладают степенью прочности, пропорциональной их количеству.

Легко понять, что каким бы ни был участок, будут применимы одни и те же рассуждения, и сила сопротивления, в общем, будет пропорциональна его величине или площади.

Если бы материал был идеально однороден по своим размерам, длина стержня не влияла бы на сопротивление прямому вытягиванию. На практике, однако, обнаружено, что увеличение длины уменьшает силу. Это следует отнести к повышенной вероятности неравенства.

(332.) Ни с помощью теории, ни с помощью эксперимента не было получено удовлетворительных результатов, учитывающих законы, по которым твердые тела сопротивляются сжатию. Способность перпендикулярного столба выдерживать размещенный на нем груз, очевидно, зависит от его толщины или величины его основания, а также от его высоты. Несомненно, что при одинаковой высоте прочность увеличивается с каждым увеличением основания, но представляется сомнительным, будет ли прочность точно пропорциональна основанию. То есть, если две колонны из одного и того же материала имеют одинаковую высоту, а основание одной вдвое больше основания другой, прочность одной будет больше, но нет уверенности, что она точно удвоит прочность другой. Согласно теории Эйлера, которая в определенной степени подтверждается экспериментами Мушенброка, прочность будет в большей пропорции увеличена, чем основание, так что, если основание удвоить, прочность увеличится более чем вдвое.

Когда основание остается прежним, прочность уменьшается при увеличении высоты, и это уменьшение прочности пропорционально больше, чем увеличение высоты. Согласно теории Эйлера, уменьшение силы пропорционально квадрату высоты; то есть, когда высота увеличивается в двукратной пропорции, сила уменьшается в четырехкратной пропорции.

(333.) Деформация, которой чаще всего подвергаются твердые тела, образующие части конструкций любого типа, - это боковая или поперечная деформация, или та, которая действует под прямым углом к их длине. Если какое-либо напряжение действует наклонно к направлению их длины, оно может быть разделено на две силы ([76.](#)), одну в направлении длины, а другую под прямым углом к длине. Та часть, которая действует в направлении длины, будет производить либо сжатие, либо прямое вытягивание, и ее эффект должен быть исследован соответствующим образом.

Хотя результаты теории, а также экспериментальных исследований представляют большие расхождения в отношении поперечной прочности твердых тел, все же есть некоторые детали, в которых они, по большей части, совпадают; этим наша цель здесь ограничить наши наблюдения, опустив все детали, относящиеся к спорным моментам.

Пусть A B C D, [рис. 186.](#) - балка, опирающаяся на свои концы A и B. Его сила поддерживать груз, направленный под углом E вниз под прямым углом к его длине, очевидно, пропорциональна его ширине, при прочих равных условиях. Балка двойной или тройной

ширины и одинаковой толщины эквивалентна двум или трем равным и одинаковым балкам, расположенным рядом. Поскольку каждый из них обладал бы одинаковой силой, все вместе взятое обладало бы удвоенной или утроенной силой любого из них.

Когда ширина и длина одинаковы, прочность, очевидно, увеличивается с увеличением глубины, но не в одинаковой пропорции. Обнаружено, что увеличение прочности намного больше по пропорции, чем увеличение глубины. Согласно теории Галилея, двойная или тройная толщина должна увеличивать прочность в четырех- или девятикратной пропорции, и эксперименты в большинстве случаев существенно не отличаются от этого правила.

Если при неизменных ширине и глубине длина балки, или, скорее, расстояние между точками опоры, изменяется, прочность будет меняться соответственно, уменьшаясь в той же пропорции, что и длина.

Из этих наблюдений следует, что поперечная прочность балки больше зависит от ее толщины, чем от ширины. Следовательно, мы обнаруживаем, что широкая тонкая доска намного прочнее, когда ее край направлен вверх. По этому принципу строятся балки или стропила полов и крыш.

Если две балки во всех отношениях одинаковы, их прочность будет пропорциональна квадратам их длин. Пусть длина, ширина и глубина одного из них соответственно вдвое больше длины, ширины и глубины другого. При удвоенной ширине балка удваивает свою прочность, но при удвоении длины вдвое эта прочность теряется. Таким образом, увеличение длины и ширины нейтрализует эффекты друг друга, и в том, что касается их, прочность балки не изменяется. Но при удвоении толщины прочность увеличивается в четырехкратной пропорции, то есть в квадрате длины. Таким же образом можно показать, что при утроении всех размеров прочность увеличивается в девятикратной пропорции и так далее.

(334.) Во всех конструкциях материалы должны выдерживать свой собственный вес, и поэтому их доступная прочность должна оцениваться по превышению их абсолютной прочности над той степенью прочности, которая как раз достаточна для того, чтобы выдержать их собственный вес. Это рассмотрение приводит к некоторым выводам, многочисленные и яркие иллюстрации которых представлены в произведениях природы и искусства.

Мы видели, что абсолютная прочность, с которой сопротивляется поперечная деформация, пропорциональна квадрату линейных размеров аналогичных частей конструкции, и, следовательно, величина этой прочности быстро возрастает с каждым увеличением размеров тела. Но в то же время вес тела увеличивается в еще более быстрой пропорции. Таким образом, если удвоить несколько измерений, сила увеличится в четыре раза, а вес - в восьмикратной пропорции. Если размеры утроить, то сила увеличится в девять раз, а вес - в двадцать семь раз. Опять же, если размеры умножить в четыре раза, сила увеличится в шестнадцать раз, а вес - в шестьдесят четыре раза, и так далее.

Следовательно, очевидно, что, хотя прочность тела небольших размеров может значительно превышать его вес, и, следовательно, оно может быть способно выдерживать нагрузку, во много раз превышающую его собственный вес; однако при значительном увеличении размеров и веса, увеличивающегося в гораздо большей степени, доступная прочность может

быть значительно уменьшена, и может быть присвоена такая величина, что вес тела должен превышать его прочность, и оно не только не сможет выдержать никакой нагрузки, но и фактически развалится на части под действием собственного веса.

Следовательно, прочность конструкции любого вида не должна определяться прочностью ее модели, которая всегда будет намного прочнее пропорционально ее размеру. Все работы, естественные и искусственные, имеют пределы масштабности, которые они не могут превзойти, хотя их материалы остаются теми же.

В соответствии с тем, что только что было объяснено, было замечено, что мелкие животные пропорционально сильнее крупных; что молодое растение обладает большей доступной силой пропорционально, чем большое лесное дерево; что дети менее подвержены травмам в результате несчастного случая, чем мужчины, и т. Д. Но хотя до известной степени эти наблюдения справедливы, все же не следует забывать, что механические выводы, которые они приводят для иллюстрации, основаны на предположении, что меньшие и большие тела, которые сравниваются, составлены из совершенно сходных материалов. Это не относится ни к одному из приведенных здесь примеров.

ГЛАВА XXI.

О ВЕСАХ И МАЯТНИКАХ.

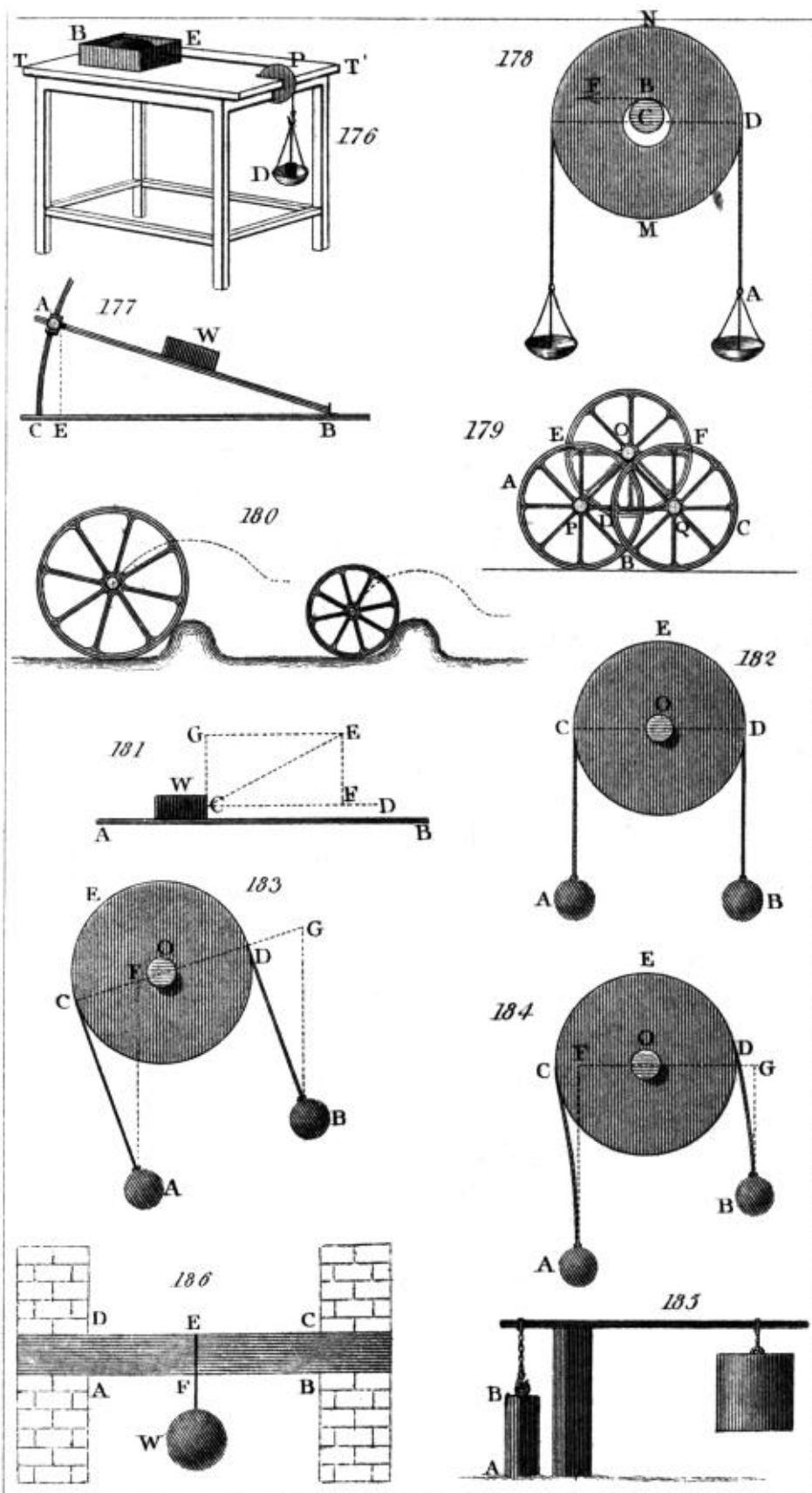
(335.) ТНЕ Предыдущие главы были почти полностью ограничены рассмотрением законов механики, не вдаваясь в конкретное описание механизмов и инструментов, зависящих от этих законов. Подобные описания слишком сильно помешали бы регулярному изучению предмета, и поэтому представляется предпочтительным посвятить главу исключительно этой части работы.

Возможно, нет идей, которые человек получает посредством чувств, которые не могли бы быть отнесены в конечном счете к материи и движению. Следовательно, по мере того, как он знакомится со свойствами одного и законами другого, его знания расширяются, его удобства умножаются; он получает возможность подчинять силы природы своей воле и создавать механизмы, которые с легкостью выполняют то, для чего напрасно был бы затрачен объединенный труд тысяч людей.

Из свойств материи одним из наиболее важных является ее вес, а элементом, который неразрывно связан с законами движения, является время.

В настоящей главе мы намереваемся описать те приборы, которые обычно используются для определения веса тел. Попытка описания различных машин, используемых для измерения времени, завела бы нас в слишком широкую область для данного случая, и поэтому мы ограничимся описанием методов, которые применялись для совершенствования того инструмента, который предоставляет наиболее точное средство измерения времени, - маятника.

Инструментом, с помощью которого мы можем определить с большей точностью, чем любыми другими средствами, относительный вес тела по сравнению с весом другого тела, принятым за эталон, являются весы.



Х. Адлард, Шотландия

Лондон, издательство Longman & Co.

О Балансе.

Весы можно описать как состоящие из негибкого стержня или рычага, называемого балкой, снабженного тремя осями; одна - точка опоры или центр движения, расположенная посередине, на которой балка поворачивается, а две другие - вблизи концов и на равных расстояниях от середины. Эти последние называются точками опоры и служат для поддержания кастрюль или весов.

Точки опоры и точка опоры находятся на одной прямой линии, и центр тяжести всего комплекса должен находиться немного ниже точки опоры, когда балка находится в горизонтальном положении.

Из того, что плечи рычага равны, следует, что если положить на весы одинаковые грузы, это никак не повлияет на положение весов, и перекаладина останется горизонтальной.

Если к гирьке на одной из чаш весов добавить немного, горизонтальность балки нарушится; и после некоторого колебания она, придя в состояние покоя, сформирует угол с горизонтом, величина которого является показателем тонкости или чувствительности весов.

Поскольку чувствительность баланса имеет первостепенное значение в хороших научных исследованиях, мы несколько подробнее рассмотрим обстоятельства, влияющие на это свойство.

На [рис. 187](#) пусть Ab представляет собой балку, вытягиваемую из горизонтального положения очень маленьким грузиком, помещенным на весы, подвешенные к точке опоры B ; тогда сила, стремящаяся вытянуть балку из горизонтального положения, может быть выражена через P_b , умноженную на такой очень маленький вес, действующий на точку B .

Пусть центр тяжести целого находится в точке G ; тогда сила, действующая на первую, будет равна G_r , умноженной на вес балки и весов, и когда эти силы равны, балка будет находиться в наклонном положении. Следовательно, мы можем видеть, что по мере приближения центра тяжести к точке S или удаления от нее (все остальное остается неизменным) чувствительность баланса будет увеличиваться или уменьшаться.

Ибо предположим, что центр тяжести перенесен на g , тогда для создания противодействующей силы, равной силе, действующей на край балки, расстояние gp от перпендикулярной линии должно увеличиваться до тех пор, пока оно не станет почти равным G_r ; но для этого конец балки B должен опуститься, что увеличит угол Hsb

Поскольку все грузы, помещенные на весы, привязаны к линии, соединяющей точки опоры, и поскольку эта линия находится выше центра тяжести балки, когда она не нагружена, такие грузы будут поднимать центр тяжести; но будет видно, что чувствительность весов, насколько это зависит от этой причины, останется неизменной.

Ибо, называя расстояние Sg единицей, расстояние центра тяжести от точки S (к которой отнесен добавленный вес) будет выражено величиной, обратной увеличенному таким образом весу балки; то есть, если вес балки удвоить с помощью гирь, помещенных на весы, Sg составит половину Sg ; и если вес балки аналогичным образом утроить, Sg составит одну треть Sg , и так далее. И поскольку G_r изменяется как Sg , gp будет обратно пропорционален увеличенному весу балки, и, следовательно, произведение, полученное путем умножения gp на вес балки и ее нагрузки, будет постоянной величиной, и чувствительность весов, как указывалось ранее, не претерпит изменений.

Теперь предположим, что точка опоры S , [рис. 188](#), расположена ниже линии, соединяющей точки опоры, и что центр тяжести балки, когда она не нагружена, находится в точке G . Кроме того, когда на весы, подвешенные к точке B , помещается очень маленький грузик, балка перемещается из горизонтального положения, причем отклонение является мерой чувствительности весов. Тогда, как указывалось ранее, Gp , умноженное на вес балки, будет равно $P'B$, умноженному на очень небольшой дополнительный вес, действующий на точку B .

Теперь, если мы поместим равные гири на обе шкалы, такие дополнительные гири будут отнесены к точке W , и результирующее расстояние центра тяжести от точки W , называемое Wg единицей, будет выражено, как и раньше, величиной, обратной увеличению веса нагруженной балки. Но Gp уменьшится в большей пропорции, чем Wg : таким образом, предположим, что вес балки удвоится, Wg составит половину от Wg ; но gp , как будет очевидно при рассмотрении рисунка, будет меньше половины Gp ; и тот же самый небольшой вес, который раньше прилагался к точке B , если теперь добавить, будет давить на точку B , пока расстояние gp не станет таким, что при умножении на вес целого произведения будет, как и прежде, равно $P' B$, умноженный на ранее упомянутый очень небольшой добавленный вес. Таким образом, чувствительность баланса в этом случае была бы повышена.

Если балка будет достаточно нагружена, центр тяжести в конце концов будет поднят до точки S опоры, и балка будет находиться безразлично в любом положении. Если затем добавить больший вес, центр тяжести будет поднят выше точки опоры, и балка перевернется.

Наконец, если точка опоры S , [рис. 189](#), находится выше линии, соединяющей две точки опоры, поскольку любые дополнительные грузы, помещенные на весы, будут отнесены к точке W на линии, соединяющей A и B . если вес балки удвоить за счет таких дополнительных грузов и, следовательно, поднять центр тяжести на g , то g станет равной половине $W G$. Но gp , будучи больше половины Gp , конец балки B будет подниматься до тех пор, пока gp не станет таким, чтобы при умножении на весь увеличенный вес балки равнялся Pb , умноженному на малый вес, который, как мы предполагаем, был помещен, как в предыдущих примерах, на весы.

Из сказанного видно, что существуют три положения точки опоры, которые влияют на чувствительность весов: во-первых, когда точка опоры и точки опоры находятся на прямой линии, чувствительность весов остается неизменной, хотя вес, которым нагружена балка, должен изменяться; во-вторых, когда точка опоры находится ниже линии, соединяющей две точки опоры, и в этом случае чувствительность весов будет увеличиваться за счет дополнительных грузов, пока, наконец, центр тяжести не будет поднят над точкой опоры, а вес, которым нагружена балка, не будет увеличен. когда балка перевернется; и, в-третьих, когда точка опоры находится выше линии, соединяющей две точки опоры, и в этом случае чувствительность баланса будет снижаться по мере увеличения веса, которым нагружена балка.

Чувствительность весов, как она определяется здесь, представляет собой угловое отклонение балки, вызванное размещением дополнительного постоянного небольшого груза на одной из чаш весов; но это часто выражается соотношением, которое такой небольшой дополнительный груз имеет к весу балки и ее груза, а иногда и к весу, значение которого необходимо определить.

Однако эта пропорция, очевидно, будет меняться в зависимости от различных весов, за исключением случая, когда центр тяжести балки находится на линии, соединяющей точки, поддерживающие весы, точка опоры находится выше этой линии, и поэтому необходимо во всех других случаях, говоря о чувствительности весов, обозначать вес, которым они нагружены: таким образом, если на весах имеется тройский фунт на каждой шкале, а горизонтальность балки изменяется на определенную небольшую величину, едва заметную при добавлении одной сотой грана, мы говорим, что весы чувствительны. к

1

1152000

часть его нагрузки с фунтом на каждой шкале, или что он будет определять вес тройского фунта в пределах

1

576000

часть целого.

Чем ближе центр тяжести весов к точке их опоры, тем медленнее будут колебания балки. Таким образом, количество колебаний, совершаемых балкой за заданное время (например, за минуту), дает наиболее точный метод оценки чувствительности весов, которое будет тем больше, чем меньше колебаний.

Балансиры самого совершенного типа, и только их мы сейчас рассматриваем, обычно снабжаются регулировками, с помощью которых длина рычагов или расстояния точки опоры от точек опоры могут быть выровнены, а точка опоры и две точки опоры расположены на одной прямой линии; но эти регулировки, как будет видно ниже, не являются абсолютно необходимыми.

Балка может иметь различную конструкцию в зависимости от целей, для которых должны применяться весы. Иногда его делают из цельного стального стержня; иногда из двух полых конусов, соединенных у основания; а в некоторых весах балка представляет собой раму в форме ромба: однако главная цель во всех случаях - сочетать прочность и негибкость с легкостью.

Лучшие весы фирмы Troughton сконструированы таким образом, что их можно хранить, когда они не используются, в выдвижном ящике под футляром; а когда они используются, они защищены от любого воздействия потоков воздуха, поскольку помещены в футляр над выдвижным ящиком, задняя и передняя части которого сделаны из листового стекла. По бокам имеются дверцы, через которые загружаются весы, а сверху есть дверца, через которую можно вынимать балку.

Прочная латунная стойка в центре шкатулки поддерживает квадратную деталь, спереди и сзади которой возвышаются две почти полукруглые арки, на которых закреплены две горизонтальные плоскости из агата, предназначенные для поддержки точки опоры. Внутри стойки находится цилиндрическая трубка, которая перемещается вверх и вниз с помощью ручки на внешней стороне корпуса. К верхней части этой внутренней трубы прикреплена арка, концы которой проходят под и снаружи двух ранее описанных арок. Эти окончания сформированы в виде Y s, предназначенных для размещения концов точки опоры, которые для этой цели выполнены цилиндрическими, когда внутренняя трубка приподнята, чтобы

разгрузить ось, когда весы не используются. При нажатии на внутреннюю трубку Y s покидает ось и остается в своем надлежащем положении на плоскостях агата. Балка имеет около восемнадцати дюймов в длину и образована из двух полых латунных конусов, соединенных у своих оснований. Толщина латуни не превышает 0,02 дюйма, но с помощью круглых колец, вбитых в конусы через определенные промежутки времени, они становятся практически негибкими. Поперек середины балки проходит стальной цилиндр, нижняя сторона которого выполнена в виде ребра с углом около тридцати градусов, которое, будучи закаленным и хорошо отполированным, образует точку опоры и опирается на агатовые плоскости на длину около 0,05 дюйма.

Каждая точка подвеса образована осью, имеющей два острых вогнутых края, на которые опираются под прямым углом два других острых вогнутых края, образованных в шпорообразной детали, к которой прикреплены струны, несущие шкалу. Две точки регулируются: одна горизонтально, с целью выравнивания плеч балки, а другая вертикально, для приведения точек подвеса и точки опоры на правильную линию.

Такова форма весов Троутона: теперь мы дадим описание весов, сконструированных мистером Робинсоном с Девоншир—стрит, Портленд-Плейс:

Длина балки этих весов всего десять дюймов. Это металлическая рама в форме ромба. Точка опоры представляет собой равностороннюю треугольную призму из стали длиной в один дюйм; но край, на котором вибрирует балка, образован под углом 120 °, чтобы предотвратить любые травмы от веса, которым она может быть нагружена. Главная особенность этих весов состоит в лезвии ножа, которое образует точку опоры, опирающуюся на агатовую плоскость по всей ее длине, тогда как в ранее описанных весах мы видели, что весь вес поддерживается только частями лезвия ножа, составляющими вместе одну десятую дюйма. Опоры для весов представляют собой лезвия ножей, каждое длиной в шесть десятых дюйма. Каждый из них снабжен двумя прижимными винтами, с помощью которых их можно расположить параллельно центральной кромке ножа.

Каждый конец балки подпружинен наклонно вверх и к середине, образуя пружину, через которую проходит толкающий винт, который служит для изменения расстояния точки опоры от точки опоры и, в то же время, своим наклонным действием поднимает или опускает ее, чтобы обеспечить средство приведения точек опоры и точки опоры на правильную линию.

Кусок проволоки длиной четыре дюйма, на котором нарезан шуруп, проходит от середины балки вниз. Он заострен и служит указателем, а на винте вращается маленький латунный шарик, изменяя положение которого, можно менять положение центра тяжести по своему усмотрению.

Точка опоры, как уже отмечалось, опирается на агатовую плоскость по всей своей длине, а чаши весов прикреплены к агатовым плоскостям, которые опираются на лезвия ножей, образующие точки опоры. У нас есть основания полагать, что таким методом поддержки весов мы обязаны мистеру Кавендишу. На нижней половине стойки, к которой прикреплена агатовая плоскость, трубка скользит вверх и вниз с помощью рычага, который выходит наружу футляра. От верха этой трубки под углом отходят рычаги к концам весов, служащие для поддержки горизонтальной детали, несущей на каждом конце по два набора Y s, один

немного выше другого. Верхние Y s предназначены для размещения агатовых плоскостей, к которым прикреплены чаши весов, и, таким образом, для снятия давления с лезвий ножей; нижние для размещения лезвий ножей, которые образуют точки опоры, следовательно, эти последние s , находясь в действии, поддерживают всю балку.

Когда рычаг освобождается от выемки, в которой он находится, пружине предоставляется возможность воздействовать на упомянутую нами трубку и поднимать ее. Верхние Y s сначала соприкасаются с агатовыми плоскостями, на которых расположены чаши для взвешивания, и освобождают их от краев ножей. Затем в действие вступают нижние Y s, которые поднимают всю балку, поднимая центральную кромку ножа над плоскостью агата. Это обычное состояние весов, когда они не используются: когда их нужно привести в действие, происходит обратное тому, что мы описали. При нажатии на рычаг центральная кромка ножа сначала соприкасается с плоскостью из агата, а затем две плоскости из агата, на которых расположены весы, укладываются на опорные кромки ножей.

Баланс этой конструкции был использован автором этой статьи при корректировке национального стандартного фунта стерлингов. При весе в тройский фунт на каждой шкале добавление одной сотой крупинки привело к изменению индекса на одно деление, равное одной десятой дюйма, и мистер Робинсон отрегулировал эти весы таким образом, что при весе в тысячу зерен на каждой шкале индекс заметно меняется при добавлении одной тысячной крупинки или одной миллионной части определяемого веса.

Возможно, будет небезынтересно привести из "Философских трудов" за 1826 год описание весов, возможно, наиболее разумных из когда-либо созданных, сконструированных для проверки национального стандартного бушеля. Автор говорит:"

"Измерьте вес бушеля вместе с 80 фунтами. объем воды, который он должен был содержать, составлял около 250 фунтов; и поскольку я не мог найти весов, способных с достаточной точностью определить такой большой вес, мне пришлось сконструировать их специально для этой цели.

Сначала я попробовал чугун; но, хотя балка была сделана настолько легкой, насколько это соответствовало требуемой степени прочности, инерция такой массы оказалась настолько значительной, что, должно быть, было потеряно много времени, прежде чем баланс соответствовал небольшим различиям, которые я хотел установить. Легкость была свойством, по существу необходимым, а объемность была очень желательна, чтобы исключить такие ошибки, которые могли возникнуть из-за частичного воздействия на балку резких перепадов температуры. Поэтому я решил использовать дерево - материал, в котором сочетались необходимые мне качества. Балка была сделана из доски красного дерева, примерно 70 дюймов в длину, 22 дюйма в ширину и 2

толстый, сужающийся от середины к концам. В центре было вырезано отверстие, и к каждой стороне доски были привинчены прочные блоки, образующие опору для задней части лезвия ножа, проходящего через центр. Блоки также были привинчены с каждой стороны к концам балки, на которые опирались тыльные стороны лезвий ножей для поддержки противней. Отверстие в центре было сделано достаточно большим, чтобы пропустить опору, которая будет описана ниже, на которую опиралось острие ножа.

“Во всех балках, которые я видел, за исключением тех, что были сделаны мистером Робинсоном, весь вес поддерживается короткими участками на концах лезвия ножа; и если вес таким образом переносится на несколько точек, лезвие ножа становится более склонным изменять свою форму и получать повреждения.

“Чтобы исправить этот дефект, центральная кромка балки, которую я описываю, была сделана длиной 6 дюймов, а две другие - длиной 5 дюймов. Это были треугольные призмы с равными сторонами в три четверти дюйма, очень тщательно обработанные, и края в конечном итоге образовывали угол в 120° .

Каждое лезвие ножа было привинчено к толстой пластине из латуни, соприкасающиеся поверхности были предварительно отшлифованы вместе; и эти пластины были привинчены к балке, причем лезвия ножей располагались в одной плоскости и настолько равноудалены и параллельны друг другу, насколько это возможно по конструкции.

“Опора, на которую опиралось центральное лезвие ножа по всей его длине, была выполнена из пластины из полированной твердой стали, привинченной к чугунному блоку. Этот блок был пропущен через упомянутое ранее отверстие в центре балки и надлежащим образом прикреплен к чугунной раме.

“Стремена, к которым были прикреплены весы, опирались на пластины из полированной стали, к которым они были прикреплены, и нижняя поверхность которых была сформирована путем тщательной шлифовки в цилиндрические сегменты. Они соприкасались с лезвиями ножей по всей длине, и было известно, что они находятся в надлежащем положении по соответствию их концов лезвиям ножей. Мистер Бейт применил хорошо продуманное приспособление для подъема балки при нагрузке, чтобы предотвратить ненужный износ лезвия ножа, и с целью регулировки положения центра тяжести, когда балка была нагружена требуемым весом, который необходимо определить, - винт, несущий подвижный шарик, выступал вертикально из середины балки.

“Эффективность этого баланса полностью оправдала мои ожидания. При весе в двести пятьдесят фунтов на каждой шкале добавление одного зернышка немедленно привело к изменению показателя на одну двадцатую дюйма, а радиус составил пятьдесят дюймов”.

Из предыдущего отчета следует, что этот баланс имеет смысл для

часть веса, которая должна была быть определена.

Теперь мы опишем метод, которого следует придерживаться при регулировании баланса.

1. Вывести точки подвеса и точку опоры на правильную линию.

Уменьшите вибрацию весов, перемещая гирю, которая влияет на центр тяжести, и переведите перекладину в горизонтальное положение с помощью маленьких кусочков бумаги, брошенных на весы. Затем нагрузите весы почти таким весом, какой только может выдержать балка. Если вибрации выполняются в то же время, что и раньше, дальнейшая регулировка не требуется; но если балка вибрирует быстрее или если она опрокидывается, заставьте ее вибрировать в то же время, что и в первый раз, переместив регулировочный груз и отметив расстояние, через которое прошел груз. Затем переместите груз в обратном

направлении на удвоенное расстояние, а затем произведите прежнее медленное движение с помощью винта, воздействующего вертикально на точку опоры. Повторяйте эту операцию до тех пор, пока регулировка не станет идеальной.

2. Сделать плечи балки равной длины.

Положите гирьки на весы, как и раньше; приведите перекладину как можно ближе к горизонтальному положению и отметьте деление, на котором находится указатель; отсоедините весы и перенесите их вместе с гирьками на другие концы перекладины, когда, если указатель указывает на то же деление, рычаги будут одинаковой длины; но если нет, приведите указатель к отмеченному делению, поместив небольшие гирьки на ту или иную шкалу. Уберите половину этих гирь и снова доведите указатель до указанного деления с помощью регулировочного винта, который действует горизонтально на точку опоры. Если известно, что весы имеют одинаковый вес, то нет необходимости менять весы, достаточно просто перенести гирьки с одних весов на другие.

Использования Весов.

Хотя мы описали метод регулировки баланса, без этих регулировок, как мы уже отмечали ранее, можно обойтись. Действительно, во всех тонких научных операциях желательно никогда не полагаться на корректировки, которые после того, как при их проведении были приложены все усилия, могут рассматриваться только как приближения к истине. Поэтому сейчас мы опишем наилучший метод определения веса тела, который не зависит от точности этих корректировок.

Выровняв корпус, в котором находятся весы, и выведя балку из строя, поместите на каждую чашу весов гирьку, почти равную весу, который необходимо определить. Очень осторожно опускайте балку, пока она не придет в действие, и с помощью регулировки подъема или опускания центра тяжести заставьте балку вибрировать очень медленно. Снимите эти гирьки и положите вещество, вес которого необходимо определить, на одну из чашек весов; осторожно уравновесьте его с помощью любых удобных веществ, положенных на другую чашу весов, и обратите внимание на деление, на котором находится указатель; снимите корпус, вес которого необходимо определить, и замените его стандартными гирьками, чтобы привести указатель к тому же делению, что и раньше. Эти веса будут равны весу тела.

Если потребуется сравнить два веса вместе, которые должны быть равными, и установить их разницу, если таковая имеется, метод действий будет почти таким же. Стандартный вес должен быть тщательно уравновешен и отмечено деление, на котором стоит индекс. А теперь будет удобно добавить на любую из шкал какой-нибудь небольшой вес, например, одну или две сотых грана, и отметить количество пропущенных в результате делений индексом, по которому будет известно значение одного деления шкалы. Это следует повторить несколько раз и для большей достоверности принять среднее значение.

Отметив деление, на котором находится указатель, следует удалить стандартный вес и заменить его весом, который необходимо сравнить с ним. Затем индекс снова следует отметить, и разница между этим и первым указанием даст разницу между весами в частях зерна.

Если баланс отрегулирован очень разумно, пройдет много времени, прежде чем он придет в состояние покоя. Поэтому иногда может быть целесообразно принять среднее значение

степени колебаний указателя за точку, в которой он будет находиться, и это может быть повторено несколько раз для большей точности. Следует, однако, помнить, что это небезопасно делать, когда степень вибраций превышает одно или два деления шкалы; но с учетом этого ограничения это, пожалуй, самый хороший метод, к которому можно прибегнуть.

Для обеспечения удовлетворительного результата необходимо принять множество мер предосторожности. Гирьки ни в коем случае нельзя трогать руками, так как это не только окислит гирьку, но и повысит ее температуру, и при помещении на весы она будет казаться легче, чем на самом деле, вследствие подъема нагретого воздуха. Для гирь большего размера следует использовать деревянную вилку или щипцы, в зависимости от формы гири; а для гирь меньшего размера наиболее удобными будут щипцы из меди. Этот металл обладает достаточной эластичностью, чтобы раскрыть щипцы при освобождении их от давления, и в то же время не оказывает сопротивления, достаточного для того, чтобы нарушить ту деликатность прикосновения, которая желательна при таких операциях.

Весов.

Должно быть очевидно, что от совершенства весов было бы мало пользы, если бы не было равной зависимости от используемых весов. Веса могут быть либо точно скорректированы, либо может быть определена разница между каждым весом и стандартом и, следовательно, установлено его истинное значение. Уже было показано, как последнее может быть осуществлено, в инструкциях, которые были даны для сравнения двух весов вместе; и теперь мы покажем наиболее удобный способ приведения весов к точному равенству с данным стандартом.

Материалом гирьки может быть латунь или платина, а ее форма может быть цилиндрической: диаметр почти вдвое больше высоты. В центр вкручивается небольшая сферическая ручка, под винтом остается пространство для размещения отрезков тонкой проволоки, используемой при регулировке. Будет удобно сформировать углубление в нижней части каждого груза для размещения ручки груза, на которую он может быть установлен.

Теперь каждый вес сравнивается со стандартом, и, если он окажется слишком тяжелым, его следует уменьшать до тех пор, пока он не станет в очень малой степени слишком легким, после чего необходимо тщательно определить величину дефицита.

Теперь нужно взять немного очень тонкой серебряной проволоки и определить ее вес в три или четыре фута. Из этого будет известно, какая длина проволоки равна погрешности регулировки веса; и эта отрезанная длина должна быть вложена под винт. Чтобы избежать любой возможной ошибки, будет желательно перед тем, как винт будет надежно закреплен на своем месте, еще раз сравнить вес со стандартным.

Наиболее одобренный метод изготовления гирь, выражающих десятичные доли грана, заключается в том, чтобы, как и прежде, с большой осторожностью определить вес определенной длины тонкой проволоки, а затем отрезать такие порции, которые равны требуемому весу.

Прежде чем мы завершим эту статью, мы приведем описание из “Анналов философии” за 1825 год "очень разумного баланса", использованного покойным доктором Блэком:

“Тонкий кусок елового дерева, не толще шиллинга, длиной в фут, шириной в три десятых дюйма посередине и в полторы десятых с каждого конца, разделяется поперечными линиями на двадцать частей; то есть по десять частей с каждой стороны от середины. Это основные подразделения, и каждое из них подразделяется на половинки и четвертинки. Поперек середины закреплена одна из самых маленьких игл, которые я смог раздобыть, чтобы служить осью, и она закреплена на своем месте с помощью небольшого количества сургуча. Нумерация делений ведется от середины до каждого конца балки. Точка опоры - это кусочек латунной пластины, середина которой лежит ровно на моем столе, когда я пользуюсь весами, а два конца загнуты под прямым углом, чтобы стоять вертикально. Эти два конца одновременно шлифуются на плоском точиле, чтобы их крайние поверхности находились в одной плоскости; и расстояние между ними таково, что игла, проведенная поперек них, опирается на них на небольшом расстоянии от боковых сторон балки. Они возвышаются над поверхностью стола всего на полторы-две десятых дюйма, так что игра луча очень ограничена. См. [рис. 190](#).

“Гирьки, которые я использую, - это один золотой шарик весом в одну грану и два или три других, каждый весом в одну десятую грана; а также несколько маленьких колец из тонкой медной проволоки, изготовленных способом, впервые упомянутым мистером Льюисом, путем прикрепления гирьки к проволоке и наматывания ее с натяжением этого гирьки на более толстую медную проволоку в виде замкнутой спирали, после чего, крепко обвязав конец спирали вощеной нитью, я зажимаю покрытую проволоку в тиски и острым ножом, по которому ударяют молотком, перерезаю покрытую проволоку. пройдите большое количество витков за один ход и найдите их настолько точно равными друг другу, насколько это возможно. Так получилось, что те, которыми я пользуюсь, являются

1

30

часть зерна в каждом, или 300 штук, весят десять зерен; но у меня есть другие, гораздо легче.

Вы поймете, что с помощью этих весов, размещенных на разных частях балки, я могу определить вес любой небольшой массы от одной крупинки или чуть больше до

1

1200

из зерна. Ибо если предмет, подлежащий взвешиванию, весит один гран, то, будучи помещенным на один конец балки, он уравновесит большой золотой груз на другом конце. Если он весит половину грана, это уравновесит тяжелый золотой вес, равный 5. Если он весит

6

10

крупинки вы должны поместить тяжелую золотую гирьку на 5, а одну из более легких - на крайний край, чтобы уравновесить ее, и если она весит всего одну, или две, или три, или

четыре сотых крупинки, она будет уравновешена одной из маленьких золотых гирьок, помещенных на первое, или второе, или третье, или четвертое деление. Если же, напротив, он весит одну грану с дробью, то ему будет противопоставлен тяжелый золотой груз на конце и один или несколько более легких, размещенных в какой-либо другой части балки.

До сих пор эта балка служила мне для любых целей; но если бы мне понадобилась более тонкая, я мог бы легко изготовить ее, взяв гораздо более тонкую и легкую полоску дерева и заточив иглу, чтобы придать ей остроту. Также было бы легко заставить его носить с собой небольшие бумажные весы для определенных целей ”.

Автор этой статьи использовал баланс такого рода и считает, что имеет смысл

размера зерна при загрузке десятью зернами. Однако там, где требуется точность, необходимо использовать весы. Это может быть сделано из тонкой картонной бумаги такой формы, как показано на [рис. 191](#).

Через два конца должна быть продета нить, затянув которую, их можно приблизить друг к другу.

Наиболее удобными грузилами для этого бруса, по-видимому, являются два веса по одному зерну каждый и один - по одной десятой зерна. Они должны быть сделаны из прямой проволоки; и если на балке сделать надрезы по делениям, они могут очень удобно вставляться в эти выемки. Будет достаточно десяти делений с каждой стороны от середины. Вес чаши весов должен быть сначала тщательно определен, чтобы его можно было вычесть из веса, определенного впоследствии, чаши весов и вещества, которое она может содержать.

Если чашу весов поместить на десятое деление балки, очевидно, что с помощью двух гирь нельзя определить больший вес, чем одно зерно и девять десятых; но если чашу весов поместить на любое другое деление балки, результирующий кажущийся вес должен быть увеличен путем умножения его на десять и деления на номер деления, на котором установлена чаша весов; и таким образом, очевидно, что если чашу весов поместить на деление с номером 1, то можно определить вес, равный девятнадцати гранам.

У нас возникло искушение описать это маленькое устройство, потому что оно чрезвычайно просто по своей конструкции, может быть легко изготовлено и может быть очень полезно использовано во многих случаях, когда не требуется предельная точность.

Описание сталелитейного завода.

Стальной груз - это рычаг с неравными плечами; и в своей наиболее простой форме он устроен так, что только один груз служит для определения множества других, перемещая его по более длинному плечу рычага и, таким образом, изменяя его расстояние от точки опоры.

В главе [xiii](#) было продемонстрировано, что в рычаге отношение силы к весу всегда будет таким же, как и отношение расстояния между ними и точкой опоры, взятое в обратном порядке; следовательно, когда используется постоянный вес и равновесие устанавливается перемещением этого груза на более длинное плечо рычага, относительный вес

взвешиваемого вещества к постоянному весу будет в той же пропорции, что и расстояние постоянного веса от точки опоры к длине более короткого плеча.

Таким образом, предположим, что длина более короткого плеча или расстояние точки опоры от точки, на которой подвешен определяемый вес, равно одному дюйму; пусть более длинное плечо рычага будет разделено на части по одному дюйму каждая, начиная с точки опоры. Теперь пусть постоянный вес будет равен одному фунту, и пусть сталелитейный завод будет сконструирован таким образом, чтобы более короткий рычаг был достаточно тяжелым, чтобы уравновесить более длинный, когда стержень разгружен. Затем предположим, что на более коротком плече подвешено вещество, вес которого составляет пять фунтов. Будет обнаружено, что когда постоянный вес находится на расстоянии пяти дюймов от точки опоры, гири будут находиться в равновесии, а штанга, следовательно, горизонтальна. Таким образом, на этом сталелитейном заводе расстояние в каждый дюйм от точки опоры указывает на вес в один фунт. Инструмент такой формы использовался римлянами, и обычно его описывают как римскую статеру или стальной завод. Его изображение приведено на [рис. 192](#).

Сталелитейный завод очень широко используется для более грубых коммерческих целей, но построен иначе, чем тот, который мы описали. Балка с весами или крючками редко находится в равновесии в точке F, когда груз P снимается; но более длинный рычаг обычно преобладает, и, следовательно, начало градаций находится не в точке F, а в некоторой точке между B и F. Обычный склад металлоконструкций, который мы представили на [рис. 193](#), обычно снабжен двумя точками, на каждой из которых может быть подвешено вещество, вес которого необходимо определить. Величина делений в этом случае увеличивается пропорционально уменьшению длины более короткого плеча. Таким образом, на сталелитейном заводе, который мы описали, если имеется вторая точка подвешивания на расстоянии полудюйма от точки опоры, каждое деление более длинного рычага будет обозначать два фунта вместо одного, и эти деления обычно отмечаются на противоположном краю сталелитейного завода, который может переворачиваться.

Этот инструмент очень удобен, потому что для него требуется всего один груз; и давление на точку опоры меньше, чем в весах, когда взвешиваемое вещество тяжелее постоянного веса. Но, напротив, когда постоянный вес превышает взвешиваемое вещество, давление на точку опоры на сталелитейном заводе больше, чем на весах, и, следовательно, весы предпочтительнее при определении малых весов. Преимущество весов также заключается в том, что разделение грузов может быть произведено с большей степенью точности, чем разделение рычага сталелитейного завода.

Металлургический завод К. Пола.

Г-н К. Поль, инспектор мер и весов в Женеве, сконструировал стальной склад, который гораздо предпочтительнее широко используемого. Г-н К. Поль утверждает, что стальные склады имеют два преимущества перед весами: 1. Ось их подвеса не нагружена никаким другим весом, кроме веса товара, за исключением постоянного веса самого устройства; в то время как ось весов, помимо веса инструмента, выдерживает вес, вдвое превышающий вес товара. 2. Использование весов требует значительного набора гирь, что вызывает пропорциональное увеличение цены устройства, независимо от вероятности ошибки, которую оно увеличивает, и от времени, затрачиваемого на установление равновесия.

1. На сталелитейном заводе К. Пола центры перемещения подвески, или два постоянных центра, расположены на точной линии делений балки; почти незаметное возвышение оси балки, предназначенное для компенсации очень небольшого изгиба стержня, за исключением одного.

2. Устройство благодаря конструкции балки сбалансировано ниже своего центра движения, так что при отсутствии подвешенного груза балка естественным образом остается горизонтальной и принимает это положение при снятии с нее, а также при загрузке склада стали, когда вес находится на делении, которое должно показывать, сколько весит товар. Горизонтальное положение на этом сталелитейном заводе, как и на других, определяется с помощью язычка, который поднимается вертикально над осью подвеса.

3. Может быть обнаружено, что стальной завод неисправен, если при отсутствии нагрузки балка не остается горизонтальной.

4. Преимущество большой и малой сторон (что, с другой стороны, увеличивает их весомость) обеспечивается очень простым процессом, который достигает той же цели с некоторыми дополнительными преимуществами. Этот процесс заключается в использовании на одном и том же делении разных весов. Номера делений на штанге указывают на степень тяжести, выраженную соответствующими весами. Например, когда большой груз большого сталелитейного завода весит 16 фунтов, каждое деление, через которое он проходит на перекладине, эквивалентно фунту; маленький груз, весящий в шестнадцать раз меньше большого, будет представлять на каждом из этих делений шестнадцатую часть фунта, или одну унцию; а противоположная сторона перекладины отмечена фунтами на каждом шестнадцатом делении. Следовательно, при такой конструкции у нас есть преимущество в том, что мы можем, используя оба веса одновременно, определить, например, почти с точностью до унции вес 500 фунтов товара. Будет достаточно добавить то, что обозначено малым весом в унциях, к значению большого веса в фунтах, после того, как будет достигнуто равновесие по положению двух гирь, а именно. большая помещается на следующий фунт ниже своего реального веса, а маленькая - на деление, которое определяет количество добавляемых унций.

5. Поскольку балка имеет градуировку только по одному краю, она может иметь форму тонкого стержня, что делает ее гораздо менее подверженной изгибу под действием веса и предоставляет место для того, чтобы сделать фигуры более заметными с обеих сторон.

6. На этих стальных верфях расположение осей не только таково, что балка представляет собой математический рычаг без груза, но и в соответствии с принципом ее разделения интервал между каждыми двумя делениями составляет определенную аликвотную часть расстояния между двумя неподвижными точками подвешивания; и каждый из двух используемых грузиков имеет за свой абсолютный вес единицу веса, который он представляет, умноженную на количество делений, содержащихся в интервале между двумя центрами движения.

Таким образом, предположим, что рычаги стальной балки разделены таким образом, что десять делений точно укладываются в расстояние между двумя постоянными центрами движения, гиря, выражающая количество фунтов на каждом делении балки, должна действительно весить десять фунтов; что для обозначения унций на тех же делениях гиря должна весить десять унций и т. Д. Так что один и тот же стальной завод может быть

приспособлен к любой системе мер, и в частности к десятичной системе, путем изменения абсолютной тяжести гирь и их соотношения друг с другом.

Но чтобы в нескольких слов обрисовать преимущества металлургических заводов, построенных К. Полем в коммерческих целях, мы только отметим:

1. Покупатель и продавец уверены в правильности работы прибора, если балка остается горизонтальной при разгрузке и в своем обычном положении. 2. Что эти стальные верфи имеют на одну подвеску меньше, чем старые, и намного проще. 3. Что с помощью этих средств мы с величайшей легкостью получаем, используя два гирьки, точный вес товара со всем приближением, которое только можно пожелать, и даже с большей точностью, чем та, которая дается обычными весами. Есть несколько таких, которые при загрузке по 500 фунтов с каждого конца дают четкое представление о разбросе на унцию; и стальные верфи К. Пола обладают этим преимуществом и стоят в два раза дешевле, чем весы равной мощности. 4. Наконец, мы можем по своему усмотрению проверить справедливость весов путем перестановки, которую позволит их соотношение друг к другу; например, наблюдая, сохраняется ли равновесие, когда вес в один фунт уменьшается на одно деление, а вес в одну унцию увеличивается на шестнадцать делений.

Именно на этом простом и выгодном принципе К. Пол построил свой универсальный сталелитейный завод. Он служит для взвешивания обычным способом и в соответствии с любой системой весов всех весомых тел с точностью до половины грана при весе в сто унций, то есть до десяти тысячной доли. Кроме того, он используется для определения удельного веса твердых веществ, жидкостей и воздуха с помощью чрезвычайно простых процессов, которые не требуют большого увеличения веса.

Мы думаем, что приведенное выше описание будет достаточно понятным без представления этого прибора. Описание его применения для определения удельного веса можно найти в томе iii. из философского журнала.

Китайский металлургический завод.

Этот инструмент используется в Китае и Ост-Индии для взвешивания драгоценных камней, металлов и т.д. Балка представляет собой небольшой стержень из слоновой кости длиной около фута. На нем нанесены три линии делений, отмеченные изящными серебряными гвоздиками, все они начинаются от конца балки, откуда первая проходит на 8 дюймов, вторая - на 6

1

2

, и третий 8

1

2

. Первый - европейский вес, а два других - китайские. На другом конце балки подвешены круглые весы, а на трех-нескольких расстояниях от этого конца расположены отверстия, через которые проходит множество тонких нитей, служащих различными точками подвешивания. Первое расстояние составляет 1

3

5

дюймов, вторые 3

1

5

, или удвоить первое, а третье - 4

4

5

, или утроите то же самое. Инструмент при использовании удерживается за одну из струн и имеет герметичный вес около 1

1

4

тройская унция перемещается по балке до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие; затем вес тела указывается с помощью вышеупомянутой градуированной шкалы.

Датский баланс.

Датские весы представляют собой прямую перекидину или рычаг, к одному концу которого прикреплен тяжелый груз, а к другому концу подвешен крюк или чаша весов для приема вещества, вес которого должен быть определен. Точка опоры подвижна и предназначена для скольжения по перекидине до тех пор, пока перекидина не примет горизонтальное положение, когда место точки опоры укажет необходимый вес. Чтобы сконструировать весы такого типа, пусть расстояние от центра тяжести до той точки, к которой подвешено взвешиваемое вещество, будет определено экспериментальным путем, когда балка разгружена. Умножьте это расстояние на вес всего устройства и разделите продукт на вес устройства, увеличенный на вес тела. Это даст расстояние от точки подвешивания, на котором установлена точка опоры, и все будет находиться в равновесии: например, предположим, что расстояние центра тяжести от точки подвешивания равно 10 дюймам, а вес всего устройства равен десяти фунтам; предположим, также, что потребовалось бы отметить деления, которые должны указывать на вес в один, два или три фунта и т.д. Во-первых, для места деления, указывающего на один фунт, мы имеем

$$10 \times 10$$

$$10 + 1$$

=

$$100$$

$$10 + 1$$

= 9

1

11

дюймы - место деления, обозначающее один фунт. Для двух фунтов мы имеем

$$100$$

$$10 + 2$$

= 8

1

3

дюймы, место деления указывает на два фунта; а для трех фунтов

100

10 + 3

= 7

9

13

дюймы для обозначения места деления, обозначающего три фунта, и так далее.

Неудобство этих весов заключается в том, что деления становятся намного короче по мере увеличения веса. Расстояние между делениями, указывающими на один и два фунта, в приведенном нами примере составляет около семи десятых дюйма, в то время как расстояние между 20 и 21 фунтом составляет всего одну десятую дюйма; следовательно, очень небольшая ошибка в расположении делений, указывающих на больший вес, приведет к очень неточным результатам. Датские весы представлены на [рис. 194](#).

Изогнутый рычаг балансировки.

Этот инструмент представлен на [рис. 195](#). Гиря в точке С закреплена на конце изогнутого рычага АВС, который опирается своей осью В на стойку I Н. К другому концу рычага в точке А. Подвешены весы Е. Через центр движения В проведите горизонтальную линию Кb G, на которую из А и С положите перпендикуляры Ak и C D. Тогда, если Bk и Bd взаимно пропорциональны весам в точках А и С, они будут находиться в равновесии, но если нет, то вес С будет двигаться вверх или вниз по дуге Fg до тех пор, пока не будет получено это соотношение. Если рычаг изогнут так, что когда А совпадает с линией Gk, С совпадает с вертикалью Bh, то по мере перемещения С от F к G его импульс будет увеличиваться, в то время как импульс гирьки на шкале Е будет уменьшаться. Следовательно, вес в Е, соответствующий различным положениям весов, может быть выражен градуированной дугой F G.

Весы Брейди, или Устройство для взвешивания.

Это соответствует свойствам как гнутых рычажных весов, так и стальной верфи. Это представлено на [рис. 196](#). АВС - это чугунная рама, на которую приходится большая часть ее веса по направлению к А. F - точка опоры, а Е - подвижный подвес с весами и крюком на нижнем конце. Е К G - это три различных места, к которым может быть применена подвеска Е и которым принадлежат соответственно три градуированные шкалы деления, выражающие веса, f С, c d и a b. Когда шкала и подвеска установлены в положение G, устройство находится в равновесии, край Ab горизонтальный, и подвеска отсекает ноль на шкале ab . Теперь, когда любое вещество, вес которого необходимо определить, помещается на весы, все устройство поворачивается вокруг F, а часть, направленная в сторону В, опускается до тех пор, пока снова не установится равновесие, когда вес тела отсчитывается со шкалы ab , которая измеряется в унциях и увеличивается до двух фунтов. Если вес тела

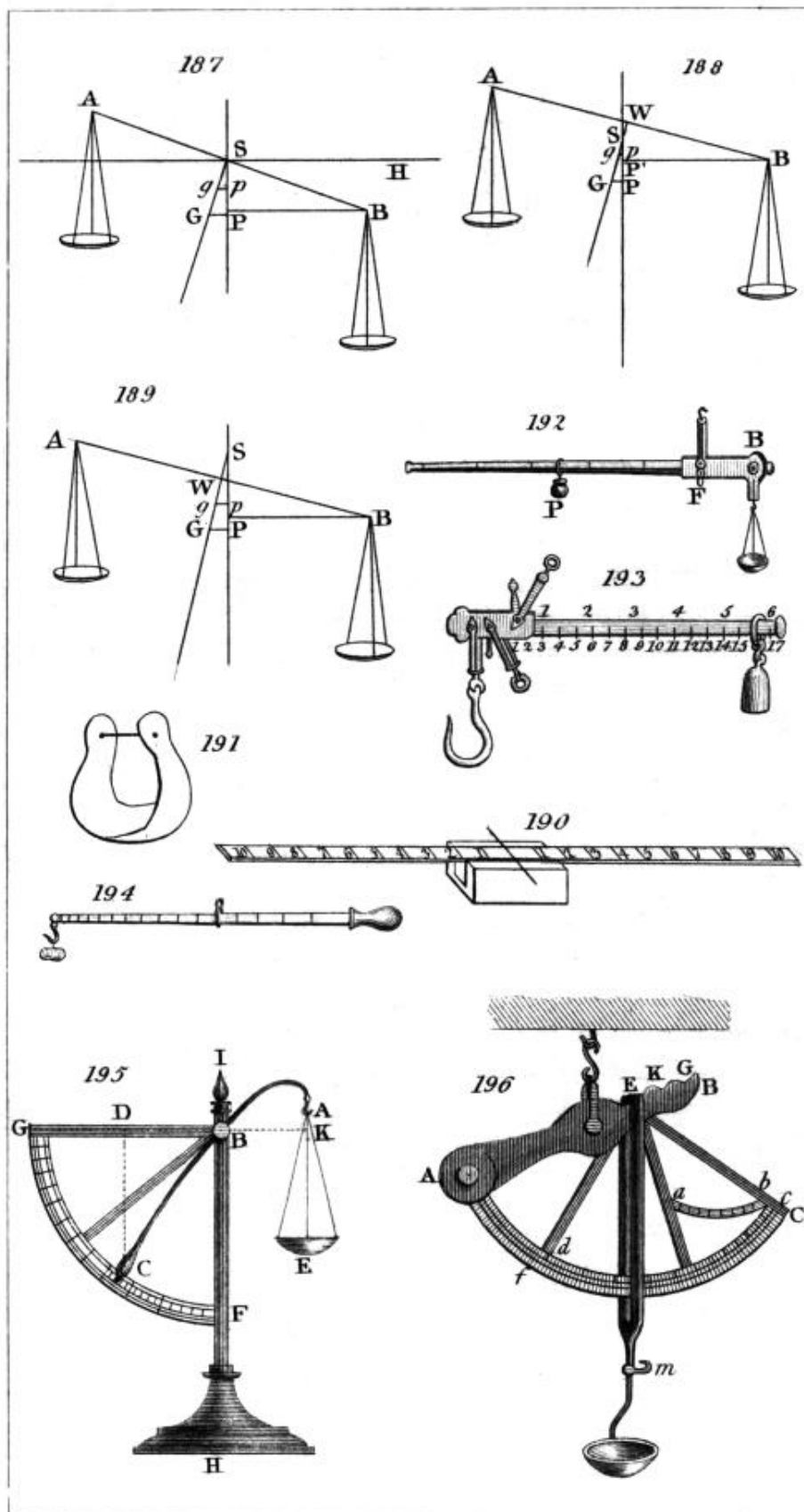
превышает два фунта, и меньше одиннадцати фунтов, подвеска ставится на отметку К; а когда шкала пуста, справа от указателя подвески находится цифра 2. Если теперь положить на весы гирию, превышающую два фунта, все снова повернется вокруг F, и вес тела будет показан на градуированной дуге с d , которая простирается до одиннадцати фунтов и регистрируется с точностью до каждых двух унций.

Если вес тела превышает одиннадцать фунтов, подвеску вешают на точку E, и веса таким же образом определяют по шкале от f С до тридцати фунтов, причем деления на этой шкале составляют четверти фунтов. Очевидно, что те же принципы применимы и к весам, большим или меньшим, чем указано выше. Чтобы избежать ошибки, три точки опоры G, K, E пронумерованы 1, 2, 3; и соответствующие дуги соответственно пронумерованы таким же образом. Когда вместо весов используется крючок, последние загибаются вверх, для этой цели имеется шарнир на m .

Весовая машина для магистральных дорог.

Эта машина предназначена для определения веса тяжелых тел, таких как колесные тележки. Он состоит из деревянной платформы, установленной над ямой, проделанной на линии дороги, и на которой находится техника. Яма огорожена изнутри, и платформа прикреплена к стенкам ямы, но не касается их, и поэтому она может свободно перемещаться вверх и вниз. Платформа поддерживается расположенными под ней рычагами и находится точно на одном уровне с поверхностью дороги, так что по ней легко передвигается экипаж, колеса которого находятся на платформе, в то время как лошади находятся на твердой земле за ней. Конструкцию этой машины легко понять, обратившись к [рис. 197](#), на котором платформа должна быть прозрачной, чтобы можно было видеть рычаги под ней.

A, B, C, D представляют собой четыре рычага, направленных к центру платформы, и каждый из них может перемещаться относительно своей точки опоры в точках A, B, C, D; точка опоры каждого опирается на деталь, надежно закрепленную в углу ямы. Платформа опирается на поперечные штыри a, b, c, d с помощью кусков железа, которые выступают из нее около ее углов и которые представлены на пластине короткими темными линиями, пересекающими штыри a, b, c, d . Четыре рычага соединены под центром платформы, но не таким образом, чтобы препятствовать их свободному движению, и поддерживаются длинным рычагом в точке F, точка опоры которого опирается на кусок каменной кладки в точке E: конец этого последнего рычага проходит под поверхностью дороги к зданию магистрали и там прикреплен к одному рычагу весов или, как в запатентованной весовой машине Salmon, к ремню, проходящему вокруг цилиндра, который наматывает небольшой груз по спирали и указывает с помощью указателя вес, установленный на платформе.



Предположим, что расстояние от А до F в десять раз больше, чем расстояние от А до а, тогда сила в один фунт, приложенная под F, уравновесит десять фунтов, приложенных к а или к платформе. Опять же: пусть расстояние от Е до G также в десять раз больше расстояния от точки опоры Е до F; тогда сила в один фунт, приложенная для поднятия конца рычага G, уравновесила бы вес в десять фунтов, приложенный к F. Теперь, поскольку мы получаем в десять раз большую мощность от первых рычагов и в десять раз больше от рычага Eg, из этого следует, что сила в один фунт, направленная на подъем G, уравновесила бы 100 фунтов. помещается на платформу; так что, если конец рычага G прикрепить к одному плечу весов, вес в 10 фунтов. помещенный на весы, подвешенные к другому плечу, будет выражать величину в 1000 фунтов. помещенный на платформу. Рычаги уравниваются, когда платформа не загружена, грузом H, приложенным к концу последнего рычага, который для этой цели продолжается за пределами точки опоры.

Инструментов для взвешивания с помощью пружины.

Пружина хорошо приспособлена к конструкции весовой машины благодаря свойству, которым она обладает, - податливости пропорционально прилагаемому усилию и, следовательно, получению шкалы из равных частей для равного увеличения веса. Однако он может пострадать, если только сталь, из которой он изготовлен, не была очень хорошо закалена, из-за отсутствия идеальной эластичности и, следовательно, из-за того, что не возвращается на свое первоначальное место после того, как был сильно сжат. Однако следует учитывать, что это в значительной степени связано с несовершенством изготовления, или используемого материала, или с тем, что он был подвергнут слишком большому усилию.

Завод пружинной стали.

Небольшой инструмент, известный под этим названием, используется очень широко и особенно удобен там, где не требуется большой точности, поскольку пружина, которая позволяет определять вес от одного фунта до пятидесяти, содержится в цилиндре длиной всего 4 дюйма и

диаметр в дюйм.

Этот прибор представлен на [рис. 198](#). Он состоит из железной трубки только что указанных размеров, закрытой снизу, к которой прикреплен железный крюк для удержания взвешиваемого вещества; железный стержень *ab*, шириной в четыре десятых дюйма и толщиной в одну десятую дюйма, прочно закреплен в круглой пластине *c d*, которая плавно скользит в железной трубке.

К этой пластине также прикреплена прочная стальная пружина, которая проходит вокруг стержня *ab*, не касаясь его и не соприкасаясь с внутренней частью цилиндрической трубки. Трубка закрыта сверху круглым куском железа, через который *проходит деталь b*.....

На лицевой стороне буквы *b* вес выражается делениями, каждое из которых обозначает один фунт, и пять таких делений на инструменте, который сейчас перед нами, занимают две

десятих дюйма. Несмотря на это, деления имеют достаточный размер, чтобы их можно было различить на глаз.

Для использования этого прибора взвешиваемое вещество подвешивается на крюке, а инструмент удерживается кольцом, проходящим через стержень на другом конце. Затем пружина подвергается сжатию, пропорциональному весу, и количество фунтов указывается делением на стержне, который обрезан верхней частью цилиндрической трубки.

Улучшенный пружинный баланс Salter.

Недавно мистер Солтер представил публике инструмент в очень изящной форме, описанный выше, под названием Improved Spring Balance. Он представлен на [рис. 199](#). Пружина находится в верхней половине цилиндра за латунной пластиной, образующей лицевую сторону инструмента; а стержень прикреплен к нижнему концу пружины, которая, следовательно, растягивается, а не сжимается, под действием веса. Деления, каждое из которых обозначает полфунта, выгравированы на лицевой стороне латунной пластины и обозначены указателем, прикрепленным к стержню.

Запатентованная часовая весовая машина Marriott.

Внешний вид этого прибора представлен на [рис. 200](#), а внутренний - на [рис. 201](#). А В С представляет собой неглубокую латунную коробку, имеющую цельную деталь, как показано на рисунке А, к которой пружина D E F прочно прикреплена гайкой на рисунке D. Другой конец пружины в точке F прикреплен к латунной детали Gh, к части которой в точке G также прикреплена железная пластина I. Винт L служит упором для удержания этой стойки на своем месте. Зубья рейки входят в зубья шестерни M, ось которой проходит через центр циферблата и имеет указатель, указывающий вес. Латунная деталь Gh представляет собой просто пластину, на которой она проходит над пружиной, а хвостовик H, к которому подвешен груз, проходит через отверстие в боковой части коробки.

Динамометра.

Это важный инструмент в механике, рассчитанный для измерения мышечной силы, проявляемой людьми и животными. По сути, он состоит из пружинного стального стержня, подобного тому, который мы описали впервые. Иногда это используется само по себе, а иногда в комбинации с различными рычагами, которые позволяют сделать пружину более тонкой и, следовательно, увеличить протяженность делений, указывающих вес.

Первый инструмент такого рода, по-видимому, был изобретен мистером Грэмом, но он был слишком громоздким и неудобным в использовании. М. Леруа изготовил инструмент более простой конструкции. Он состоял из металлической трубки длиной около фута, расположенной вертикально на подставке и содержащей внутри спиральную пружину, над которой располагался градуированный стержень, заканчивающийся шаром. Этот стержень входил в трубку более или менее пропорционально силе, приложенной к глобусу, и деления указывали величину этой силы. Поэтому, когда человек нажимал на глобус из всех сил, деления на стержне показывали количество фунтов веса, которому он был равен.

Прибор такого рода для определения силы удара, нанесенного человеком кулаком, недавно был выставлен в Национальном хранилище. Он был прикреплен к стене, из которой выступал горизонтально. На месте шара была подушка, принимающая удар, и поскольку внезапность, с которой возвратилась пружина, сделала невозможным прочесть деление на стержне, другой стержень, разделенный таким же образом, был вдавлен пластиной, образующей основу подушки, и оставался неподвижным, когда возвратилась пружина. Однако обычный пружинный стальной прибор, который мы описали впервые, в принципе такой же, как динамометр М. Леруа, и имеет гораздо более удобную конструкцию для рассматриваемых нами целей. Кольцо на одном конце может быть прикреплено к неподвижному предмету, а крюк на другом - к человеку или животному, и степень, до которой градуированный стержень вытягивается из цилиндра, сразу показывает прилагаемое усилие. Хотя это, пожалуй, лучший и, безусловно, самый простой динамометр, были изобретены и другие, которые, однако, являются всего лишь модификациями пружинного сталелитейного завода. Один из них представлен на [рис. 202](#). Спиральная пружина действует описанным выше образом, но ее деления увеличены в размере и, следовательно, становятся более заметными благодаря закрепленной на пластине рейке, действующей на спиральную пружину, зубья которой перемещают шестерню, на которой закреплен рычаг I, указывающий на градуированную дугу K.

Другой динамометр был изобретен мистером Сэлмоном; он представлен на [рис. 203](#) и представляет собой комбинацию рычагов с пружиной. Посредством этих рычагов можно использовать гораздо более тонкую пружину, которая, следовательно, более чувствительна, чем в динамометре, описанном ранее.

Способ действия этих рычагов и пружины будет легко понят при рассмотрении рисунка. Подобно весам для тележек, точка опоры каждого рычага находится на одном конце, и усилие уменьшается при передаче на пружину пропорционально длине ее плеч. Пружина перемещает шестерню с помощью рейки, на шестерню которой помещается стрелка, указывающая с помощью делений на круглом циферблате величину приложенного усилия.

Пружина, используемая в этой машине, рассчитана на вес всего около 50 фунтов. вместо примерно 5 cwt., как в последнем описанном; но с помощью рычагов, которые находятся между ним и прилагаемой силой, он будет служить для оценки силы, равной 6 cwt., и, очевидно, его можно увеличить в гораздо большей степени, изменяя соотношение длин плеч рычагов.

О КОМПЕНСАЦИОННЫХ МАЯТНИКАХ.

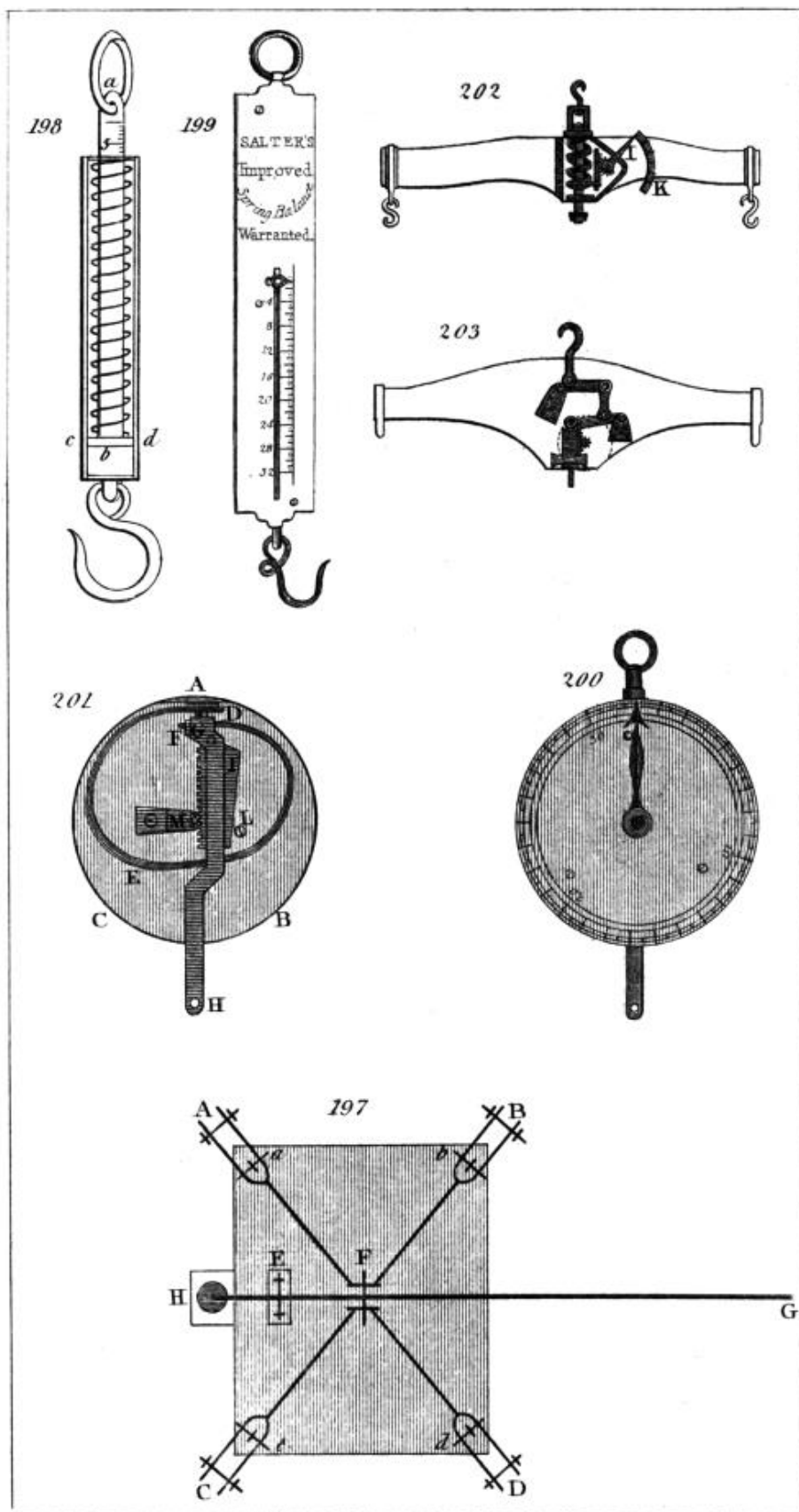
(336.) О Галилее говорят, что, когда он был совсем маленьким, он заметил лампу, подвешенную к крыше церкви в Пизе и раскачивающуюся взад-вперед маятниковым движением. Если бы это вообще было замечено необразованным умом, то, скорее всего, прошло бы мимо как обычное явление, недостойное малейшего внимания; но для ума, увлеченного наукой, ни одно происшествие не является незначительным; и обстоятельство, кажущееся самым тривиальным, под воздействием гигантской силы расширенного интеллекта может приобрести огромное значение для совершенствования и благополучия человека. Говорят, падение яблока подсказало Ньютону теорию тяготения, и его могущественный ум быстро распространил на все творение этот великий закон, который

приводит к падению яблока на землю. Раскачивание лампы в церкви в Пизе, замеченное проницательным умом Галилея, привело к появлению инструмента, который позволяет наиболее точно измерять время, который служит для определения формы земли и который неразрывно связан со всеми усовершенствованиями современной астрономии.

Свойства маятника и способ, которым он служит для измерения времени, были полностью объяснены в главе [xi](#); и если бы удалось найти вещество, не подверженное каким-либо изменениям в своих размерах в результате изменения температуры, больше ничего не потребовалось бы, поскольку центр колебаний всегда оставался бы на одном и том же расстоянии от точки подвешивания. Однако, поскольку каждое известное вещество расширяется при нагревании и сжимается при охлаждении, длина маятника будет меняться при каждом изменении температуры, и, следовательно, время его колебания будет претерпевать соответствующее изменение. Эффект разницы температур в 25° , или той, которая обычно возникает между зимой и летом, привел бы к тому, что часы, снабженные маятником с железным стержнем, выиграли бы или проиграли шесть секунд за двадцать четыре часа.

Таким образом, стало чрезвычайно важным найти какое-либо средство противодействия этому изменению, которому была подвержена длина маятника, или, другими словами, разработать метод, с помощью которого центр колебаний при каждом изменении температуры оставался бы на одном и том же расстоянии от точки подвешивания: к счастью, разница в скорости расширения различных металлов представляла собой готовое средство для осуществления этого.

Грэм в 1715 году провел несколько экспериментов, чтобы установить относительные расширения различных металлов, с целью воспользоваться разницей в расширениях двух или более из них, когда они противоположны друг другу, для построения компенсирующего маятника. Но разница, которую он обнаружил, была настолько мала, что он отказался от всякой надежды достичь своей цели таким образом. Зная, однако, что данное изменение температуры гораздо сильнее влияет на ртуть, чем на любой другой предмет, он увидел, что если бы можно было заставить ртуть подниматься, в то время как стержень маятника становился длиннее, и *наоборот*, центр колебаний можно было бы всегда удерживать на одном и том же расстоянии от точки подвешивания. Эта идея, к счастью, породила ртутный маятник, который сейчас находится в самом широком использовании.



Тем временем предложение Грэма пробудило изобретательность Харрисона, первоначально плотника из Бартона в Линкольншире, который в 1726 году изготовил маятник, состоящий из параллельных латунных и стальных стержней, известный под названием решетчатый маятник.

В ртутном маятнике стержень или груз - это материал, обеспечивающий компенсацию; но в решетчатом маятнике цель достигается за счет большего расширения латунных стержней, которые поднимают стержень вверх по направлению к точке подвешивания настолько, насколько стальные стержни удлиняются вниз.

В настоящей статье мы опишем такие компенсационные маятники, которые, по нашему мнению, лучше всего подходят на практике; и мы надеемся, что сможем упростить предмет настолько, чтобы сделать ненужными знания математики при конструировании этого важного инструмента.

В следующей таблице приведены данные о линейном расширении различных веществ на части их длины, вызванном изменением температуры на один градус. Мы взяли на себя смелость извлечь его из очень ценной статьи Ф. Бейли, эсквайра, о ртутном компенсационном маятнике, опубликованной в "Воспоминаниях Лондонского астрономического общества" за 1824 год.

ТАБЛИЦА I.

Линейное расширение различных веществ на один градус термометра по Фаренгейту.

Вещества.	Расширения.	Авторы.		
Белая сделка,	·0000022685	Капитан Катер.		
	·0000028444	доктор Струве.		
	Английское кремневое стекло,	·0000047887	Дюлонг и Пти.	
		·0000061700	Генерал Рой.	
		·0000065668	Дюлонг и Пти.	
	Чугун (литой),	Железо (провода),	·0000068613	Лавуазье и Л.
		Железо (пруток),	·0000069844	Хаслар.
{	{	Сталь	·0000063596	General Roy.

(прутковая),		Уполномоченные
Латунь,	·0000104400	по
„Свинец,	·0000159259	— результат
Цинк,	·0000163426	нескольких
Цинк (кованый),	·0000172685	экспериментов.
Ртуть <i>оптом,</i>	·00010010	Смитон.
		То же самое.
		То же самое.
		Дюлонги и Пти.

Из этой таблицы легко определить длину стержня из любого вещества, расширение которого должно быть равно расширению стержня данной длины из любого другого вещества.

Длина таких стержней будет обратно пропорциональна их расширению. Следовательно, если мы разделим меньшее расширение на большее (предположим, что стержень, длина которого задана, изготовлен из материала с меньшей растяжимостью) и умножим данную длину на это частное, мы получим требуемую длину стержня, расширение которого будет равно расширению данного стержня. Например: —Расширение стального стержня из приведенной выше таблицы равно · 0000063596, а латунного - · 0000104400; если бы потребовалось определить длину латунного стержня, который должен расширяться на столько же, на сколько стальной стержень длиной 39 дюймов, мы имеем

$$\cdot 0000063596$$

$$\cdot 0000104400$$

$$= \cdot 6091, \text{ что, умноженное на } 39, \text{ дает } 23 \cdot 75 \text{ дюймов для требуемой длины латуни.}$$

Здесь, чтобы упростить расчеты, мы приведем соотношение длин таких веществ, которые могут быть использованы в конструкции компенсационных маятников.

ТАБЛИЦА II.

Компенсация стального стержня и латуни, как 1:	· 6091
Компенсация железной катанки и свинца,	· 4308
Компенсация стального стержня и свинца,	· 3993

Компенсация железной катанки и цинка,	· 3973
Компенсация стального стержня и цинка,	· 3682
Компенсация стеклянного стержня и свинца,	· 3007
Компенсация стеклянного стержня и цинка,	· 2773
Компенсация металлического стержня и свинца,	· 1427
Компенсация металлического стержня и цинка,	· 1313
Стальной стержень и ртуть в стальном цилиндре,	·0728
Стальной стержень и ртуть в стеклянном цилиндре,	·0703
Стеклянный стержень и ртуть в стеклянном цилиндре,	·0529

Очевидно, что в этой таблице десятичные дроби выражают длину стержня из компенсирующего материала, растяжение которого равно растяжению стержня маятника, длина которого равна единице.

Поскольку нам неизвестно о существовании какой-либо работы, содержащей инструкции, которые могли бы позволить художнику или любителю изготовить компенсационный маятник, мы постараемся предоставить такую подробную информацию, которая избавит объект от любых трудностей.

Маятник часов обычно подвешен на пружине, прикрепленной к его верхнему концу и проходящей через прорезь, проделанную в детали, которая называется курком маятника. Таким образом, точкой подвешивания является та часть пружины, которая соприкасается с нижней поверхностью крана. Теперь расстояние от центра колебаний маятника до этой точки можно изменять двумя способами: одним путем протягивания пружины через эту щель, а другим путем поднятия качалки маятника. Любой из этих методов может быть применен в компенсационном маятнике, но первый вызывает возражения, от которых освобождается второй.

Предположим, что потребовалось бы уравновесить стальной маятник длиной 39 дюймов посредством расширения латунного стержня. Здесь, ссылаясь на [рис. 204](#), мы имеем стальной стержень диаметром 39 дюймов (который должен оставаться постоянным); маятниковая пружина, проходящая через кран в точке S, прикреплена к другому стальному

стержню, который прикреплен к поперечине Ra в точке A. Другой конец поперечины в точке R прикреплен к латунному стержню, нижний конец которого прикреплен к рычажку маятника в точке B. Теперь латунный стержень Bg должен расширяться вверх на столько, на сколько стальной стержень Ac расширяется вниз; и длина латуни должна быть такой, чтобы обеспечить это, оставляя 39 дюймов стального стержня ниже рычажка маятника.

Давайте сначала попробуем использовать 80 дюймов стали. Умножив это на $\cdot 6091$, мы получим $48 \cdot 73$ дюйма для длины латуни, что компенсирует 80 дюймов стали. Но поскольку $48 \cdot 73$ дюйма стали, равной по длине латуни, в этом случае были бы расположены выше рычага маятника, под ним осталось бы всего $31 \cdot 27$ дюймов вместо 39 дюймов.

Давайте теперь попробуем использовать 100 дюймов стали. Это, умноженное, как и раньше, на $\cdot 6091$, дает $60 \cdot 91$ дюйм, согласно использованным нами расширениям, для длины латунного стержня, и оставляет $39 \cdot 09$ дюймов ниже курка маятника, что достаточно близко для нашей настоящей цели.

Из сказанного мы можем сделать вывод, что общая длина материала, из которого изготовлен стержень маятника, всегда должна быть равна длине маятника, добавленной к длине компенсатора.

В этом примере мы достигли нашей цели, протянув пружину маятника через щель; но теперь мы покажем, как то же самое можно сделать, перемещая качалку маятника. На [рис. 205](#) пусть Sc, как и раньше, равна 39 дюймам. Пусть стальной стержень Sd отвернется под прямым углом в точке D, а латунный стержень Bg длиной 61 дюйм поднимется перпендикулярно от этой поперечины к R. К верхней части латунного стержня прикрепите другую поперечину Ra, а от конца A опустите стальной стержень к E, сгибая его, как показано на рисунке, до тех пор, пока он не достигнет C. Теперь общая длина стальных кусков, расширяющихся книзу, равна Sd, Df и Fc (что вместе составляет 39 дюймов), к которым нужно добавить длину стали, равную длине латунного стержня Bg, (61 дюйм), что вместе составляет 100 дюймов стали, как и раньше, расширение которой вниз компенсируется расширением латунного стержня длиной 61 дюйм, что составляет расширяющийся вверх.

Однако эта форма, очевидно, неудобна из-за большой длины латуни и стали, которые крепятся над рычажком маятника; но это одно и то же, независимо от того, изготовлены ли латунь и сталь из одного куска или разделены на несколько, при условии, что все стальные куски расположены так, чтобы расширяться книзу, а латунные - вверх. Таким образом, на [рис. 206](#) участки стали, расширяющиеся книзу, вместе равны, как и раньше, 100 дюймам, а два латунных куска, расширяющиеся вверх, вместе равны 61 дюймам. Так что, фактически, две последние формы компенсации, которые мы описали, принципиально не отличаются друг от друга, а только расположением материалов. Последняя представляет собой половину решетчатого маятника, остальные стержни являются просто дубликатами тех, что мы описали, и не служат никакой другой цели, кроме как для образования надежной рамы.

Решетчатый маятник Харрисона.

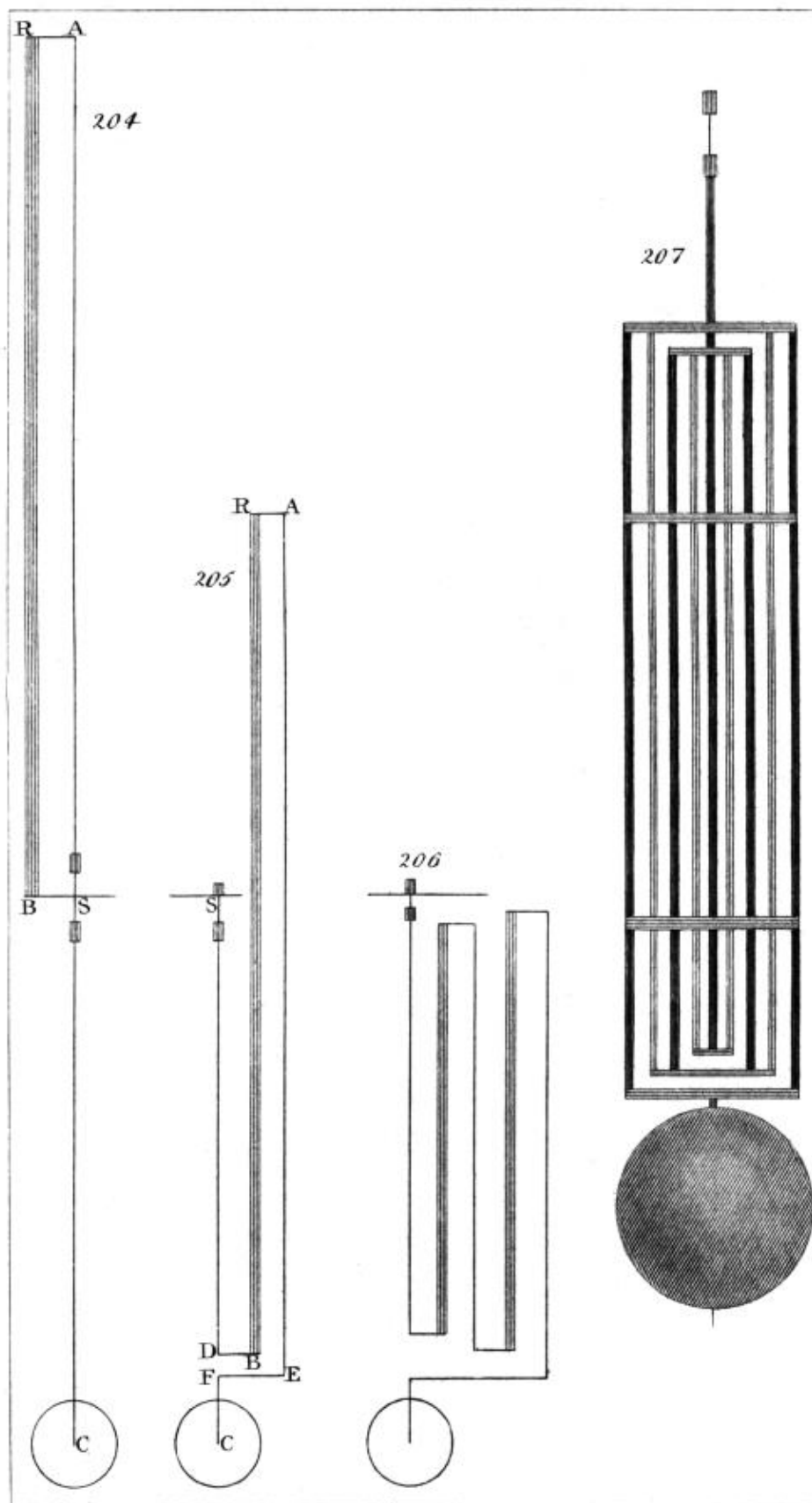
После того, что было сказано, требуется немногим больше, чем дать представление об этом маятнике. Это показано на [рис. 207](#), на котором более темные линии обозначают стальные стержни, а более светлые - латунные. Центральный стержень прикреплен своим нижним концом к середине третьей поперечины снизу и свободно проходит через отверстия в

поперечинах, которые находятся сверху, в то время как другие стержни прикреплены своими концами к поперечным деталям с помощью проходящих через них штифтов. Чтобы сделать конструкцию более надежной, стержни свободно проходят через отверстия, сделанные в двух других поперечинах, концы которых прикреплены к наружным стальным проволокам. Поскольку разные виды одного и того же металла различаются по скорости расширения, при испытании готового маятника может оказаться, что он не получил должной компенсации. В этом случае одна или несколько поперечин сдвигаются выше или ниже на перекладинах и закрепляются штифтами, продетыми через новые отверстия.

Трубчатый маятник Трoutона.

Это замечательная модификация решетчатого маятника Харрисона. Он представлен на [рис. 208.](#) где видно, что он имеет вид простого маятника, поскольку вся компенсация скрыта внутри трубки диаметром шесть десятых дюйма.

Стальная проволока диаметром около одной десятой дюйма обычным образом прикреплена к пружине, на которой подвешен маятник. Эта проволока проходит к нижней части внутренней латунной трубки, в центре которой она прочно привинчена. Верхняя часть этой трубки закрыта, стальной стержень свободно проходит через отверстие в центре. В верхнюю часть этой внутренней трубки ввинчиваются две стальные проволоки диаметром в одну десятую дюйма в отверстия, сделанные таким диаметром, который находится под прямым углом к движению маятника. Эти провода проходят вниз по трубке, не касаясь ни ее, ни центрального стержня, через отверстия, сделанные в деталях, закрывающей дно внутренней трубки. Нижние концы этих проводов, которые немного выступают за пределы внутренней трубки, надежно закреплены в деталях, закрывающей дно внешней латунной трубки, диаметр которой достаточен для того, чтобы внутренняя трубка могла свободно проходить через нее, и достаточной длины, чтобы немного выступать над ней. Верхняя часть внешней трубы закрыта так же, как и внутренняя, и также имеет отверстие в центре, позволяющее первому стальному стержню свободно проходить через нее. В верхнюю часть внешней трубки диаметром, совпадающим с движением маятника, ввинчивается вторая пара стальных проволок того же диаметра, что и первая, причем расстояние между ними и центральным стержнем равно расстоянию каждой из них от первой пары. Следовательно, они проходят вниз по внутренней трубе и через отверстия, сделанные в деталях, закрывающих нижние концы как внутренней, так и внешней труб. Нижние концы этих проволок прикреплены к короткому цилиндрическому куску латуни того же диаметра, что и внешняя трубка, к которой стержень подвешен за центр.



Капитан. Кейтер, дел. Х. Адлард, Шотландия

Лондон, издательство Longman & Co.

Рис. 209. представляет собой сечение стержня в натуральную величину; три концентрических круга обозначают две трубки, а прямоугольное положение двух пар проволок вокруг средней показано пятью маленькими кружками.

На рис. 210. показана деталь, которая закрывает верхний конец внутренней трубки. Два маленьких круга - это два провода, которые отходят от него, а три больших круга показывают отверстия, через которые проходят средний провод и другая пара проводов.

Рис. 211. - нижняя часть внутренней трубки. Маленький круг в центре - это место, где к нему прикреплен центральный стержень, остальные - отверстия для прохождения остальных четырех проводов.

На рис. 212. показана часть, которая закрывает верхнюю часть внешней трубки. В большом круге в центре закреплена маленькая латунная трубка, которая служит прикрытием для верхней части среднего провода, а два маленьких круга предназначены для размещения проводов последнего расширения.

На рис. 213. изображена нижняя часть внешней трубки, на которой маленькими кружочками показаны места крепления проводов второго расширения, а большими - отверстия для прохождения другой пары проводов.

Рис. 214. представляет собой цилиндрический кусок латуни, показывающий способ крепления к нему нижних концов проволок последнего расширения, а отверстие посередине - это то, с помощью которого он прикрепляется к центру боба. Верхние концы двух пар проводов, как мы видели, закреплены путем ввинчивания их в детали, которые закрывают концы трубок, но на нижних концах все они закреплены, как показано на [рис. 214](#). Фигуры, представленные *фигами. 213.* и *214.* имеют каждое совместное движение, посредством которого соединительные провода каждой пары были бы одинаково натянуты, хотя они не были точно одинаковой длины.

Действие этого маятника, очевидно, такое же, как и у решетчатого маятника, поскольку у нас есть три отрезка стали, расширяющиеся вниз, и два отрезка латуни, расширяющиеся вверх. Вес маятника имеет тенденцию выпрямлять стальные стержни, а трубчатая форма латунного компенсатора эффективно устраняет опасность его изгиба; преимущество, которого нет у решетчатого маятника, в котором используются латунные стержни.

Мистер Троутон к отчету, который он дал об этом маятнике в дневнике Николсона за декабрь 1804 года, добавил длины различных частей, из которых он был составлен, и расширения латуни и стали, на основе которых были рассчитаны эти длины. Длина внутренней трубки составляла 31·9 дюймов, а внешней - 32·8 дюймов, к которым следует добавить 0·4, величину, на которую в этом маятнике центр колебаний выше центра боба. Все они изготовлены из латуни. К стальным деталям относятся: — средняя проволока, которая, включая 0·6, длину пружины подвески, составляет 39·3 дюйма. Первая пара проводов 32·5 дюймов, а вторая пара - 33·2 дюйма. Для латуни использовались расширения ·00001666 и для стали ·00000661 в частях их длины для одного градуса температуры.

Маятник Бензенберга.

Этот маятник упоминается в дневнике Николсона за апрель 1804 года и взят из журнала Фойгта "Новые знания о природе", том iv. стр. 787. Компенсация, по-видимому,

осуществлялась с помощью единственного свинцового стержня в центре толщиной около полудюйма; опускающиеся стержни были сделаны из лучшей толстой железной проволоки.

Поскольку этот маятник заслуживает внимания из-за легкости, с которой его можно изготовить, и поскольку другие, которые были произведены с тех пор, в принципе похожи на него, мы дали его изображение на [рис. 215.](#), где A B C D - это два стержня из железной проволоки, прикованные к поперечинам A C B D. Ef представляет собой свинцовый стержень, прикрепленный к середине детали Bd, а также на его верхнем конце к поперечине Gh, в которой закреплена вторая пара железных проволок, которые свободно проходят вниз через отверстия, сделанные в поперечине B D. Нижние концы этих последних железных проволок прикреплены к элементу Kl, который удерживает качалку маятника.

Чтобы определить длину поводка, необходимую для компенсации, мы должны помнить, как и прежде, что расстояние от точки подвешивания до центра стержня (всегда говоря о маятнике, предназначенном для секундной вибрации) должно составлять 39 дюймов. Предположим, что общая длина железной проволоки равна 60 дюймам; тогда, исходя из приведенной нами таблицы, мы имеем $\cdot 4308$ для длины свинцового стержня, растяжение которого эквивалентно растяжению железного стержня, длина которого равна единице. Умножая 60 дюймов на $\cdot 4308$, мы получаем $25 \cdot 84$ дюйма свинца, что компенсировало бы 60 дюймов железа; но это, взятое из 60 дюймов, оставляет только $34 \cdot 16$ вместо 39 дюймов. Пробуя снова, аналогичным образом, $68 \cdot 5$ дюймов железа, мы находим $29 \cdot 5$ дюймов свинца для длины, что дает эквивалентную компенсацию, и которая, взятая из $68 \cdot 5$ дюймов, оставляет 39 дюймов.

Длина свинцового стержня, необходимая в качестве компенсации в этом маятнике, составляет около 29

1

2

дюймов.

Автор этой статьи хотел бы предложить другую форму этого маятника, преимущество которой заключается в большей простоте конструкции.

S A, [рис. 216.](#), представляет собой стержень из железной проволоки, к которому прикреплена пружина маятника. Над ним проходит цилиндрическая трубка из свинца, 29

1

2

дюймов длиной, который либо прикреплен своим нижним концом к концу железного стержня Sa, либо опирается на гайку, плотно навинченную на конец этого стержня.

Трубка из листового железа проходит поверх трубки из свинца и снабжена сверху фланцем, с помощью которого она опирается на свинцовую трубку; или она может быть прикреплена к верхней части этой трубки любым способом, который может быть сочтен удобным.

Стержень маятника может быть либо надет на железную трубку (продлен до достаточной длины) и закреплен штифтом, проходящим через центр стержня, либо железная трубка может заканчиваться железной проволокой, служащей для той же цели.

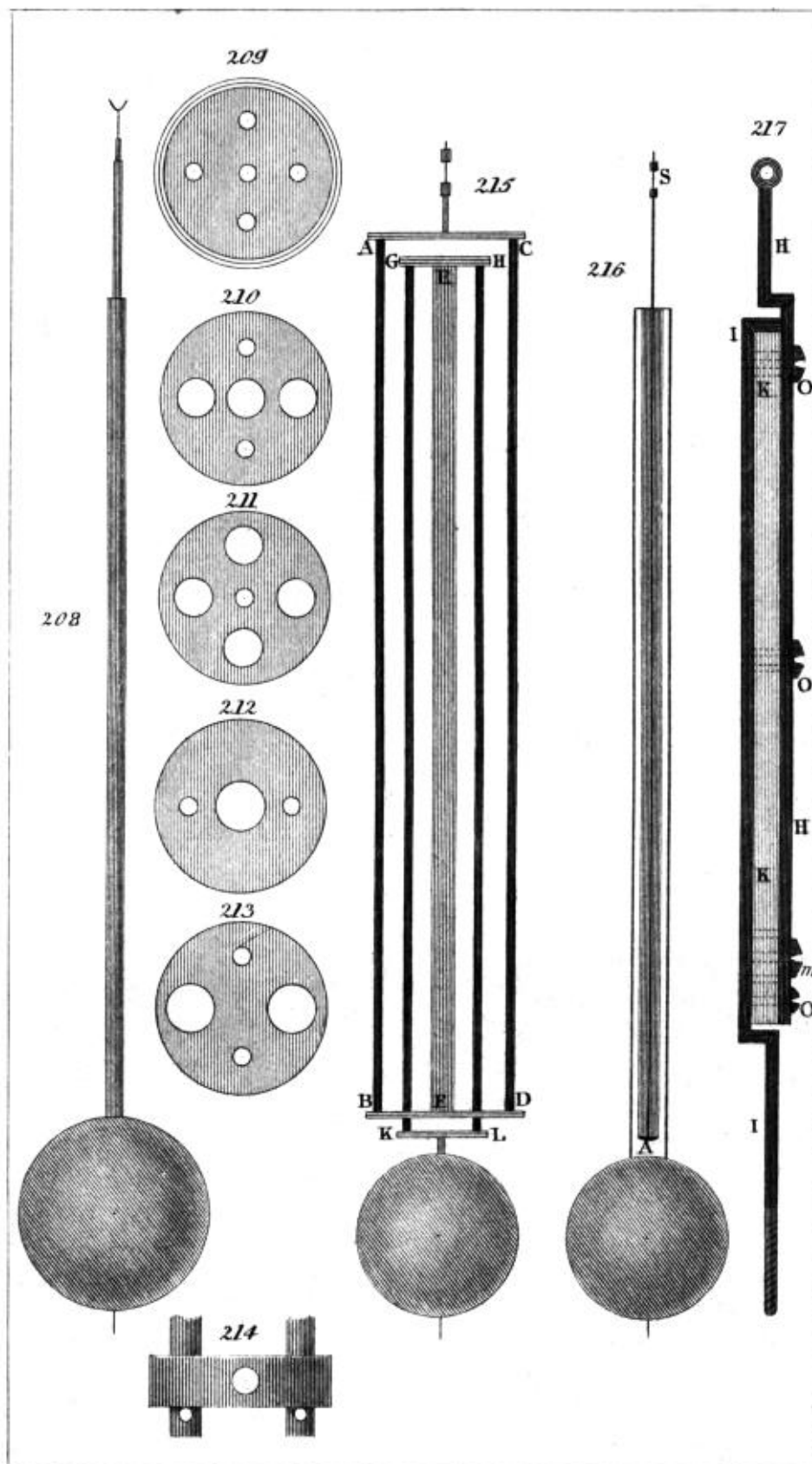
Здесь мы, очевидно, имеем те же расширения вверх и вниз, что и в форме сетки, приданной этому маятнику г-ном Бензенбергом, в сочетании с компактностью трубчатого маятника Трoutона.

Компенсационный маятник Уорда.

В 1806 году мистер Генри Уорд из Блэндфорда в Дорсетшире получил серебряную медаль Общества искусств за компенсационный маятник, который мы собираемся описать.

Рис. 217. вид сбоку стержня маятника в собранном виде. Нн и I I - это два плоских железных стержня толщиной около восьмой части дюйма. Кк - это цинковый стержень, расположенный между ними и имеющий толщину почти в четверть дюйма. Углы железных прутьев скошены, что придает им гораздо более светлый вид. Эти стержни удерживаются вместе с помощью трех винтов Оо Оо, которые проходят через продолговатые отверстия в стержнях Нн и Кк и вкручиваются в стержень I. Стержень Н Н крепится к стержню из цинка Кк с помощью винта *m*, который называется регулировочным винтом. Этот винт вставляется в Нн и проходит как раз через Кк; но та часть винта, которая проходит через Кк, имеет отвернутую резьбу. Железный стержень I I имеет выступ на верхнем конце, он опирается на верхнюю часть цинкового стержня К К и полностью поддерживается им. Для регулировки компенсации предусмотрено несколько отверстий для винта *m*.

Действие этого маятника аналогично описанному ранее, цинк расширяется вверх настолько же, насколько железные стержни расширяются вниз, и, следовательно, расстояние от точки подвешивания до центра колебаний остается тем же самым.



Капитан. Кейтер, дел. Х. Адлард, Шотландия

Лондон, издательство Longman & Co.

Г-н Уорд утверждает, что расширение используемого им цинка (штампованного цинка) было больше, чем указано в таблицах. Он обнаружил, что истинная длина цинкового бруска должна составлять около 23 дюймов; по нашим расчетам, она составила бы почти 26.

Компенсационная трубка Жюльена Леруа.

Мы упоминаем об этом просто для того, чтобы указать, что в принципе он аналогичен устройству, представленному на [рис. 204](#), с той лишь разницей, что вместо стального стержня, прикрепленного к поперечине, исходящей из латунного стержня Вg, он прикреплен к колпачку, закрепленному на латунной трубке (через которую он проходит) той же длины, что и латунный стержень В R. Кассини хорошо отзывался об этом маятнике, и он использовался в обсерватории Клюни примерно в 1748 году.

Компенсация Депарсье.

Это было изобретено в том же году, что и изобретение Жюльена ле Руа. Он представлен на [рис. 218](#), где A B D F - стальной стержень, концы которого должны быть прикреплены к нижним сторонам деталей, образующих часть рычага маятника. Корпус изготовлен из латуни и стоит так, что его концы опираются на горизонтальную часть Bd стальной рамы. Верхняя часть Eі латунной рамки проходит над рычагом маятника и пропускает резьбовой провод K, к которому прикреплена пружина маятника через квадратное отверстие посередине. Гайка на этой проволоке с резьбой обеспечивает регулировку времени. Пружина проходит через щель в кране обычным способом.

Легко заметить, что этот маятник в принципе такой же, как у Леруа; увеличение общей длины стального стержня A B S C вниз компенсируется эквивалентным расширением латунного стержня G E вверх. Это, однако, предпочтительнее, чем у Леруа, потому что компенсация содержится в корпусе часов.

Депарсье ранее, в 1739 году, опубликовал усовершенствование маятника с несовершенной компенсацией, предложенное в 1733 году часовщиком из Шалона Реньо. В этом маятнике Депарсье использовал рычаг с неравными плечами, чтобы усилить эффект расширения латунного стержня, который был слишком коротким.

Здесь мы можем заметить, что все фиксированные компенсации подвержены одному и тому же недостатку, а именно тому, что они не движутся вместе с маятником и, следовательно, не имеют точно такой же температуры.

Компенсационный маятник капитана Кейтера.

В дневнике Николсона за июль 1808 года приведено описание компенсационного маятника автором этой статьи. В этом маятнике стержень сделан из белой проволоки шириной в три четверти дюйма и толщиной в четверть дюйма. Его поместили в духовку и оставляли там надолго, пока он немного не подгорел. Затем концы были пропитаны расплавленным сургучом; а стержень после очистки несколько раз покрыли копаловым лаком. К нижнему концу стержня был прочно прикреплен латунный колпачок, от которого отходил прочный стальной винт для регулирования хода маятника обычным способом.

Была отлита квадратная труба из цинка длиной семь дюймов и площадью три четверти квадратного дюйма; внутренние размеры составляли четыре десятых дюйма. Нижняя часть

стержня маятника была срезана с двух сторон, чтобы он мог совершенно свободно скользить внутри цинковой трубки. Ко дну этой цинковой трубки был припаян кусок латуни толщиной в четверть дюйма, в котором было проделано круглое отверстие диаметром почти в четыре десятых дюйма с винтом внутри. Цинковый цилиндр, снабженный соответствующим винтом на поверхности, вставляемый в это отверстие, и тонкая латунная пластина, навинченная на цилиндр, служили фиксатором для предотвращения любого сотрясения после определения длины цинка, необходимой для компенсации. Через ось цилиндра было проделано отверстие, через которое проходил стальной винт, заканчивающий стержень маятника.

В стержне маятника было проделано отверстие, идущее к его центру, для прохождения квадратной цинковой трубки, которая была прикреплена своим верхним концом к центру стержня. Стержень маятника проходил через бобышку обычным способом, и все это поддерживалось гайкой на стальном винте на конце.

В этой форме компенсация воздействует непосредственно на центр боба, поднимая его вдоль стержня настолько, насколько стержень удлиняется вниз: метод расчета длины требуемой компенсации точно такой же, как мы приводили ранее.

Предполагая, что длина стержня для раскладки составляет 43 дюйма, и умножая это на $\cdot 1313$ из [таблицы II](#), мы получаем $5 \cdot 64$ дюйма для длины цинка, необходимой для противодействия расширению раскладки. Длина стального винта между концом стержня маятника и гайкой составляла два дюйма, а длина пружины подвески - один дюйм. Теперь, 3 дюйма стали, умноженные на $\cdot 3682$, дадут $1 \cdot 10$ дюймов для длины цинка, что компенсирует сталь, и, добавив это к $5 \cdot 64$ дюймам, мы получим $6 \cdot 74$ дюйма для всей необходимой длины цинка.

В этом маятнике длину компенсирующей части можно изменять с помощью цинкового цилиндра, снабженного для этой цели винтом. Качание этого маятника и его компенсация представлены на [рис. 219](#).

Против использования деревянных маятниковых стержней высказывались возражения, поскольку их трудно, если не невозможно, защитить от воздействия влаги, что сразу же стало бы фатальным для их правильной работы. Однако маятник, который сейчас перед нами, двигался с небольшими перерывами с тех пор, как был впервые сконструирован: он прикреплен к звездным часам, не имеющим превосходного описания, и подвержен очень значительным колебаниям влажности и сухости; однако изменение его частоты было настолько незначительным, что дает основание полагать, что влага мало или вообще не оказывает никакого воздействия на деревянный стержень, подготовленный описанным нами способом. Его скорость при различных температурах показывает, что он перекомпенсирован; длина оставшегося цинка, как указано в журнале Николсона, составляет $7 \cdot 42$ дюйма, вместо которых, согласно нашей нынешней компенсации, она должна составлять $6 \cdot 78$ дюймов.

Компенсационный маятник Рида.

Мистер Адам Рид из Вулвича подарил Обществу искусств в 1809 году компенсационный маятник, за который был вознагражден пятнадцатью гинейми. Этот маятник в принципе аналогичен последнему описанному; стержень, однако, изготовлен из стали, а не из дерева, и компенсатор не имеет средств регулировки. Этот маятник представлен на [рис. 220](#), где Sb -

стальной стержень, немного толще в том месте, где он входит в стержень С, и имеет форму ромба для предотвращения проворачивания стержня, но сверху и снизу он цилиндрический.

Трубка из цинка D проходит к центру стержня снизу, и стержень опирается на нее с помощью детали, которая пересекает его центр и соприкасается с верхним концом трубки.

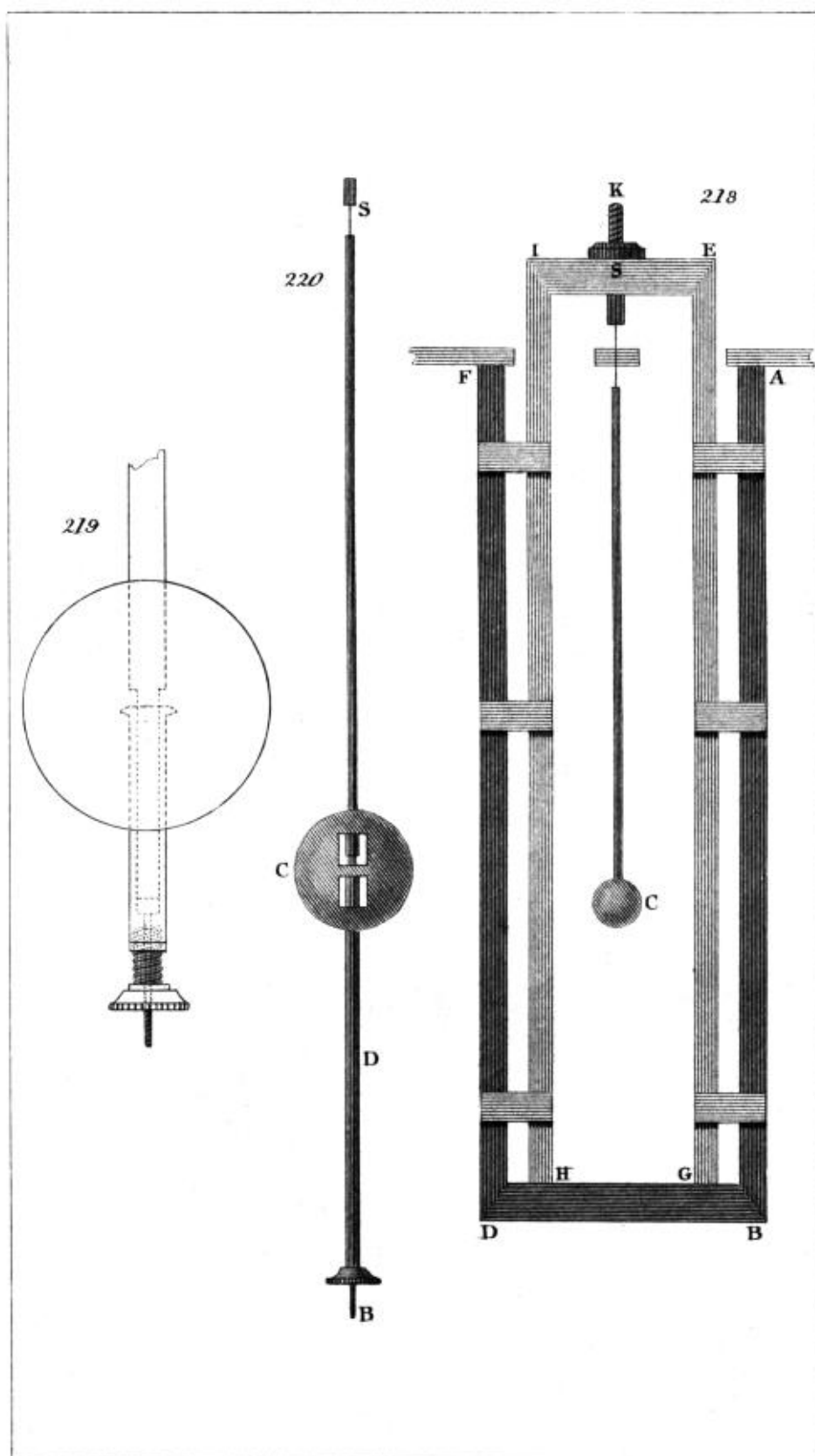
После того, как стержень пропускается через бобину и цинковую трубку, на винт на нижнем конце стержня обычным способом надевается гайка. Если компенсация должна быть слишком большой, цинковую трубку следует укоротить до тех пор, пока она не станет правильной.

Длина цинковой трубки в этом маятнике будет такой же, как и в маятнике мистера Уорда, — около 23 дюймов, если полагаться на его эксперименты.

Недостатком этого маятника, по-видимому, является его большая длина, которая составляет 62 дюйма. Мы предполагаем, что было бы предпочтительнее разместить цинк над стержнем, как в предложенной нами модификации маятника Бензенберга.

Маятник Элликотта.

Похоже, что идея объединить расширения различных металлов с помощью рычага, чтобы сформировать компенсационный маятник, возникла у м-ра Грэма; поскольку м-р Шорт в "Философских трудах" за 1752 год утверждает, что м-р Шелтон сообщил ему, что м-р Грэхем в 1737 году изготовил маятник, состоящий из трех стержней, один из которых стальной, а два из латуни; и что стальной стержень воздействовал на рычаг так, что поднимал маятник, когда удлинялся под действием тепла, и опускал его, когда укорачивался под действием холода.



Капитан. Кейтер, дел. Х. Адлард, Шотландия

Лондон, издательство Longman & Co.

Однако при испытании было обнаружено, что этот маятник движется рывками, и поэтому изобретатель отложил его в сторону, чтобы освободить место ртутному маятнику.

Мистер Шорт также говорит, что мистер Фотерингем, квакер из Линкольншира, в 1738 или 1739 году изготовил маятник, состоящий из двух стержней, одного из латуни, а другого из стали, скрепленных вместе винтами с рычагами для поднятия или опускания стержня, и что эти рычаги были размещены над стержнем.

Мистер Джон Элликотт из Лондона провел очень точные эксперименты по относительному расширению семи различных металлов, которые, однако, как будет обнаружено, более или менее отличаются от результатов экспериментов других ученых. Однако из этого не следует делать вывод, что определения Элликотта были ошибочными, поскольку расширение металла претерпевает значительные изменения даже в результате процессов, которым он обязательно подвергается при изготовлении маятника. Поэтому при изготовлении компенсационного маятника желательно, чтобы расширение используемых материалов определялось после выполнения процессов сверления, опилования и забивания молотком.

По поводу решетчатого маятника Харрисона были высказаны возражения, что регулировка стержней неудобна и что расширение стержня, поддерживаемого на его нижнем краю, если не принять это во внимание, сведет на нет компенсацию. Предполагается, что эти соображения привели к созданию маятника Элликотта, который почти аналогичен тем, которые мы только что упомянули.

Маятник Элликотта сконструирован следующим образом: Латунный и железный стержни прочно скреплены вместе на своих верхних концах, при этом латунный стержень лежит на железном стержне, который является стержнем маятника. Эти стержни удерживаются рядом друг с другом с помощью винтов, проходящих через продолговатые отверстия в латуни и вставляемых в утюг, и, таким образом, латуни разрешается свободно расширяться или сжиматься на утюге при любом изменении температуры. Латунный стержень проходит до центра выступа маятника, немного выше и ниже которого утюг оставлен более широким для крепления к нему рычагов, и утюг сделан достаточной длины, чтобы полностью проходить через выступ маятника.

Оси двух прочных стальных рычагов поворачиваются в двух отверстиях, просверленных в широкой части железного стержня. Короткие плечи этих рычагов соприкасаются с нижним концом латунного стержня, а их более длинные плечи поддерживают стержень маятника, упираясь в головки двух винтов, которые проходят горизонтально с каждой стороны стержня по направлению к его центру. Продвигая эти винты к центру бобышки, более длинные плечи рычага укорачиваются, и, таким образом, можно легко регулировать компенсацию. На нижнем конце железного стержня, под стержнем, закреплена прочная двойная пружина, которая поддерживает большую часть веса стержня за счет давления вверх в двух точках, расположенных на равных расстояниях от стержня маятника. Мистер Элликотт дал описание этого маятника Королевскому обществу в 1752 году, но он говорит, что идея была реализована в 1738 году. Поскольку этот маятник встречается очень редко, мы считаем излишним давать его представление.

Компенсация осуществляется с помощью составного стержня из стали и латуни.

Было предложено несколько вариантов компенсации для маятников с помощью составного стержня, сформированного из стали и латуни, спаянных вместе. В бруске такого типа латунь

расширяется сильнее, чем сталь, при изменении температуры брус изгибается, латунная сторона становится выпуклой, а стальная - вогнутой под действием тепла. Теперь, если стержень такого описания своими концами опирается на опоры с каждой стороны курка маятника, при этом стержень проходит над курком латунным верхом, если маятниковая пружина прикреплена к середине стержня и она проходит обычным образом через щель курка, очевидно, что при повышении температуры стержень изогнется вверх, а маятниковая пружина вытянется вверх через щель, и, таким образом, удлинение маятника вниз будет компенсировано. Компенсацию можно регулировать, изменяя расстояние точек опоры от середины перекладки.

Таков был один из способов компенсации, предложенных Николсоном. Другие модели того же описания (то есть со сложными стержнями) были представлены публике мистером Томасом Даути и мистером Дэвидом Ричи; но поскольку предполагается, что они могут вызвать множество практических возражений, мы не считаем необходимым описывать их более подробно.

Однако существует способ компенсации с помощью составной планки, описанный М. Био в первом томе его "Характеристики физического развития", который, по-видимому, обладает значительными достоинствами, о которых он упоминает, впервые став свидетелем успешного применения изобретателем, часовщиком по имени Мартин. На [рис. 221](#), слева направо, показан стержень маятника, изготовленный обычным способом из железа или стали; этот стержень проходит через середину составного стержня из латуни и стали (латунь находится снизу), который должен быть снабжен короткой трубкой и винтами, с помощью которых или продев штифт через трубку и стержень, его можно надежно закрепить в любой части стержня маятника.

Два небольших одинаковых груза будут скользить по составной перекладке и, после определения их надлежащего положения, могут быть надежно закреплены.

Способ, которым действует эта компенсация, следующий: —Предположим, что температура повышается, латунь расширяется сильнее, чем сталь, стержень становится изогнутым, а его концы, несущие грузы W и W , приподнимаются, и, таким образом, место центра колебаний при правильной настройке компенсации приближается к точке подвешивания настолько, насколько оно было удалено от нее при удлинении стержня маятника.

Существует три метода регулировки этой компенсации: первый - путем увеличения или уменьшения гирь W и W ; второй - путем изменения расстояния гирь W и W от середины штанги; и третий - путем изменения расстояния штанги от выступа маятника, стараясь не проходить мимо середины штанги. Эффект компенсации возрастает по мере того, как гири W и W становятся больше или удаляются от центра штанги, а также по мере приближения штанги к качанию маятника.

Месье Био говорит, что он и месье Матье долгое время использовали маятник такого типа при проведении астрономических наблюдений, в которых они стремились достичь предельной точности, и что они обнаружили, что его скорость всегда была совершенно регулярной.

Предполагается, что во всех описанных нами маятниках стержень прикрепляется к стержню с помощью штифта, проходящего через его центр, а регулировка времени производится с помощью небольшого груза, скользящего по стержню.

Ртутного маятника.

При описанном нами расположении маятников мы руководствовались сходством используемого способа компенсации; теперь мы должны рассмотреть тот метод компенсации, который осуществляется путем расширения материала, из которого состоит сам стержень маятника.

По этому вопросу, как мы уже отмечали ранее, превосходную статью, вышедшую из-под пера мистера Фрэнсиса Бейли, можно найти в "Мемуарах Лондонского астрономического общества", которая не оставляет желать лучшего читателю-математику. Но поскольку наша цель - упростить и сделать наши предметы настолько популярными, насколько это возможно, мы должны попытаться заменить совершенную точность, представленную в статье м-ра Бейли, такими правилами, которые могут быть сочтены не только легко понятными, но и практически применимыми, в пределах тех неизбежных ошибок, которые возникают из-за недостатка знаний о точном расширении используемых материалов.

На [рис. 222](#) пусть S_b представляет стержень маятника, а F_{cb} - металлическую трубку или цилиндр, поддерживаемую гайкой на конце стержня маятника обычным способом и имеющую большую растяжимость, чем у стержня. Теперь C , центр тяжести, предполагая, что стержень невесом, будет находиться в середине цилиндра; и если S_b , или половина цилиндра, будет иметь такую длину, чтобы расширяться вверх на столько, на сколько стержень маятника S_b расширяется вниз, очевидно, что центр тяжести C останется при любом изменении температуры на том же расстоянии от точки подвешивания S . М. Био предполагал, что при осуществлении этого будет получена достаточно точная компенсация; но м-р Бейли показал, что это ни в коем случае не факт.

Предположим, что у маятника обычной конструкции центр колебаний находится в точке O , примерно на три или четыре десятых дюйма, ниже центра тяжести. Теперь целью компенсации является сохранение неизменным расстояния от S до O , а не расстояния от S до C .

Расстояние от центра колебаний изменяется в зависимости от длины цилиндра F_b и, следовательно, изменяется его расстояние от точки подвешивания из-за удлинения цилиндра, хотя расстояние от центра тяжести C до точки подвешивания остается неизменным.

Мы постараемся сделать это совершенно привычным. Предположим, что металлический цилиндр длиной 6 дюймов подвешен на нити длиной 36 дюймов, образуя таким образом маятник, в котором расстояние центра тяжести от точки подвешивания составляет 39 дюймов: центр колебаний в таком маятнике будет находиться почти на одну десятую дюйма ниже центра тяжести. Теперь давайте представим, что цилиндрические части равной длины нужно добавлять к каждому концу цилиндра, пока он не достигнет точки подвешивания; тогда у нас будет цилиндр длиной 78 дюймов, центр тяжести которого все еще будет находиться на расстоянии 39 дюймов от точки подвешивания. Но хорошо известно, что центр колебаний такого цилиндра находится на расстоянии примерно двух третей его длины от точки подвешивания. Таким образом, центр колебаний был удален за счет удлинения цилиндра примерно на 13 дюймов ниже центра тяжести, в то время как центр тяжести оставался неподвижным.

Теперь то же самое, что мы только что описали, происходит, хотя и в очень незначительной степени, с нашим бывшим цилиндром, используемым в качестве компенсатора маятника. Стержень расширяется вниз, центр тяжести остается на том же расстоянии от точки подвешивания, а цилиндр удлиняется как выше, так и ниже этой точки; следствием этого является то, что, хотя центр тяжести оставался неподвижным, расстояние центра колебаний от точки подвешивания увеличилось. Следовательно, очевидно, что длина компенсатора должна быть такой, чтобы центр тяжести находился немного ближе к точке подвешивания, чем это было до того, как произошло расширение; благодаря этому центр колебаний будет восстановлен на прежнем расстоянии от точки подвешивания.

Предположим, что расширения имели место и что центр тяжести, оставаясь на том же расстоянии от точки подвешивания, центр колебаний смещен на большее расстояние, как мы уже объясняли ранее. Хорошо известно, что произведение расстояния от точки подвешивания до центра тяжести на расстояние от центра тяжести до центра колебаний является постоянной величиной; следовательно, если расстояние от центра тяжести до точки подвешивания уменьшить, расстояние от центра тяжести до центра колебаний пропорционально, хотя и неравномерно, увеличится, и центр колебаний, следовательно, будет приподнят. Таким образом, мы видим, что если мы поднимем центр тяжести точно на требуемую величину, используя достаточную длину компенсирующего материала, то, хотя расстояние от центра тяжести до точки подвешивания уменьшается, все же расстояние от точки подвешивания до центра колебаний не изменится.

Следующее правило для определения длины компенсирующего материала в маятнике рассматриваемого нами типа будет признано достаточно точным для всех практических целей:—

Найдите указанным выше способом длину компенсирующего материала, растяжение которого будет равно растяжению стержня маятника. Удвойте эту длину и увеличьте изделие на одну десятую часть, что даст общую требуемую длину. Мы приведем примеры этого по мере продолжения.

Ртутный маятник Грэма.

Именно в 1721 году Грэм впервые установил маятник, подобный этому описанию, и подверг его экспериментальной проверке; но, по-видимому, впоследствии он был отложен в сторону, чтобы освободить место решетчатому маятнику Харрисона или другим маятникам аналогичного описания. Однако в последние несколько лет его достоинства были более широко известны, и неудивительно, что его следует рассматривать как предпочтительный по сравнению с другими, как из-за простоты его конструкции, так и из-за совершенной легкости, с которой может быть скорректирована компенсация.

Мы уже ссылались на очень удачную статью мистера Бейли об этом маятнике и возьмем на себя смелость извлечь из нее следующее описание:

На [рис. 223](#) приведен чертеж ртутного маятника, сконструированного способом, предложенным мистером Бейли.

“Стержень Sf изготовлен из стали и совершенно прямой; его форма может быть либо цилиндрической, диаметром около четверти дюйма, либо плоской, шириной в три восьмых дюйма и толщиной в одну восьмую дюйма: его длина от S до F, то есть от нижней части

пружины до нижней части стержня в точке F, должна составлять 34 дюйма. Нижняя часть этого стержня, которая проходит через верхушку стремени и примерно на полдюйма выше и ниже его, должна быть сформована в *крупный* и *глубокий* винт диаметром около двух десятых дюйма с примерно тридцатью витками на дюйм. Стальная гайка с фрезерованной головкой должна быть надета на конец стержня, чтобы поддерживать стремя; и аналогичная гайка также должна быть надета на стержень, *над* головкой стремени, чтобы надежно привинтить его и, таким образом, зафиксировать в нужном положении после того, как оно будет отрегулировано *почти* до требуемого положения. Эти гайки представлены на рисунках В и С. В стержне прорезана небольшая щель, где он проходит через головку стремени, через которую ввернут стальной штифт Е, чтобы стремени не проворачивалось на стержне. Само стремя также изготовлено из стали, а боковые части должны быть той же формы, что и стержень, чтобы они могли легко нагреваться. Верхняя часть стремени состоит из плоского куска стали, по форме похожего на чертеж, толщиной чуть более трех восьмых дюйма. В середине верха (глубина которого в этой части составляет около одного дюйма) должно быть просверлено отверстие достаточно большого размера, чтобы винт стержня мог проходить *свободно*, но без *встряхивания*. Внутренняя высота стремени от А до D может составлять 8

1

2

дюймов, а внутренняя ширина между прутьями около трех дюймов. Нижний кусок должен быть толщиной около трех восьмых дюйма и иметь углубление глубиной почти в четверть дюйма, чтобы свободно помещался стеклянный цилиндр. Этот стеклянный цилиндр должен иметь латунную или железную крышку, которая должна свободно закрывать его горловину, с выступающими по бокам выступами, с помощью которых он должен быть привинчен к боковым перекладинам стремени и, таким образом, всегда находиться в одном и том же положении. Этот колпачок не должен *давить* на стеклянный цилиндр, чтобы предотвратить его расширение. Приведенные выше меры могут потребовать небольшой модификации в зависимости от веса используемой ртути и величины баллона: окончательную регулировку, однако, можно смело оставить на усмотрение художника. Некоторые специалисты рекомендовали, чтобы на ртути плавал круглый кусок толстого листового стекла, чтобы сохранить его поверхность равномерно ровной.⁷ Деталь внизу, обозначенная как Н, представляет собой кусок латуни, прикрепленный винтами к передней части нижней части стремени через небольшое отверстие, в которое продевается стальная проволока или обычная игла, чтобы указывать (на шкале, прикрепленной к корпусу часов) дугу вибрации. Эта проволока должна просто оставаться в отверстии, чтобы ее можно было легко извлечь, когда потребуется отсоединить маятник от часов, чтобы стремя могло надежно стоять на своем основании. Одно из отверстий для винта должно быть немного больше корпуса винта, чтобы можно было произвести небольшую регулировку на случай, если стальная проволока не будет стоять точно перпендикулярно оси движения. Шкалу следует делить на *градусы*, а не на *дюймы*, учитывая, что при радиусе 44 дюйма (расчетное расстояние от изгиба пружины до конца стальной проволоки) длина каждого градуса на шкале должна составлять 0.768 дюймов”.

Чтобы определить длину ртутного столба, необходимую для формирования компенсации для этого маятника, мы должны действовать следующим образом:—

Предположим, что длина стального стержня и стремени вместе равна 42 дюймам. Абсолютное расширение ртути равно $\cdot 00010010$; но требуется не абсолютное расширение, а вертикальное расширение в стеклянном цилиндре, и на это, очевидно, будет влиять расширение основания этого цилиндра. Легко доказуемо, что, если мы умножим линейное расширение любого вещества (всегда предполагается, что оно составляет очень малую часть его длины) на 3, мы можем во всех случаях принять результат за кубическое или абсолютное расширение такого вещества. Аналогичным образом, если мы умножим линейное расширение на 2, то получим поверхностное расширение.

Если мы хотим получить видимое расширение ртути, абсолютное или кубическое расширение стеклянного сосуда должно быть вычтено из абсолютного расширения ртути, что приведет к ее избыточному или кажущемуся расширению. Аналогичным образом, вычитая поверхностное расширение стекла из абсолютного расширения ртути, мы получим его относительное вертикальное расширение. Теперь, приняв скорость расширения стекла равной $\cdot 00000479$ и умножив ее на 2, относительное вертикальное расширение ртути в стеклянном цилиндре составит $\cdot 00010010 - \cdot 00000958 = \cdot 00009052$.

Расширение стального стержня, согласно нашей таблице, равно $\cdot 0000063596$; что, разделенное на $\cdot 00009052$, дает $\cdot 0703$ для длины ртутного столба, расширение которого равно расширению стального стержня, длина которого равна единице.

Теперь нам нужно умножить 42 дюйма на $\cdot 0703$, что дает $2 \cdot 95$ дюймов; и это, вычитаемое из 42, оставляет $39 \cdot 1$ дюйм; так что выбранная нами длина стержня достаточно близка к истине. Теперь удвойте $2 \cdot 95$ дюймов и добавьте одну десятую его произведения, и мы получим $6 \cdot 49$ дюймов для длины ртутного столба, образующего необходимую компенсацию. Более точный расчет мистера Бейли дает $6 \cdot 31$ дюйм.

Может быть выполнен ртутный компенсационный маятник, имеющий цилиндр из стали или железа, верхняя часть которого сконструирована таким же образом, как верхняя часть стремени, чтобы в нее помещался винт стержня. Чтобы найти длину ртутного столба, необходимую для маятника такого типа (то есть для цилиндра, изготовленного из стали), мы должны удвоить линейное расширение стали и взять его из абсолютного расширения ртути, чтобы получить относительное вертикальное расширение ртути. Это будет $\cdot 00010010 - \cdot 00001272 = \cdot 00008738$; и, продолжая, как и раньше, мы имеем

$$\cdot 0000063596$$

$$\cdot 00008738$$

$$= \cdot 07279.$$

Пусть длина стального стержня будет, как и раньше, 42 дюйма. Умножив это на $\cdot 07279$, мы получаем $3 \cdot 057$, что, будучи удвоено и прибавив одну десятую от произведения, мы получаем $6 \cdot 72$ дюйма для длины компенсирующего ртутного столба; по словам мистера Бейли, это равно $6 \cdot 59$.

Ртутный компенсационный маятник со стеклянным стержнем был использован автором этой статьи, у которого были основания хорошо отзываться о его работе. Его дешевизна и простота очень рекомендуются. Это всего лишь стеклянный цилиндр глубиной около 7 дюймов и толщиной 2

дюймов в диаметре, заканчивающийся длинной шейкой, которая образует стержень маятника, весь выдутый одним куском. Латунный колпачок с помощью винтов крепится к верхней части стержня, к которому прикреплена маятниковая пружина.

У нас есть неоспоримые основания утверждать, что ртутный маятник обычной конструкции, то есть со стальным стержнем и стеклянным цилиндром, не подвержен изменению температуры одновременно во всех своих частях. Теперь, поскольку маятник, который мы рассматриваем, выполнен целиком из одного и того же материала и в каждой части одинаковой толщины, предполагается, что он не может расширяться в линейном направлении до тех пор, пока температура не достигнет всей внутренней поверхности стекла, когда она быстро рассеется по массе ртути. М. Био упоминает, что маятник такого типа раньше использовался во Франции, и выражает свое удивление по поводу того, что им больше не пользуются, поскольку он слышал, что о нем очень хорошо отзывались. Автор этой статьи также использовал маятник со стеклянным стержнем, который отличается от того, который мы только что упомянули, тем, что нижний конец стержня прочно закреплен в гнезде, прикрепленном к центру круглой железной пластины, по окружности которой вырезан винт, который входит в железный хомут, поддерживающий цилиндр (к которому он приклеен) с помощью круглого выступа.

Это устройство, хотя, возможно, и менее совершенное, чем то, которое мы только что описали, поскольку маятник не является цельным, имеет то преимущество, что позволяет разместить на поверхности ртути круглую стеклянную пластинку, как практиковал мистер Браун. Чтобы определить длину ртутного столба для стеклянного маятника, предположим, что стекло, включая цилиндр, имеет длину 41 дюйм. Умножаем это на $\cdot 0529$, число, взятое из таблицы II. для стеклянного стержня и ртути в стеклянном цилиндре у нас есть $2 \cdot 17$ дюймов для нескорректированной длины ртути, что компенсирует 41 дюйм стекла. Предположим, что стальная пружина имеет длину полтора дюйма: умножив это на $\cdot 0703$, соответствующую десятичную дробь, взятую из [таблицы II](#), мы имеем $0 \cdot 1$, длину ртутного столба, обусловленную сталью, что составляет с учетом первого $2 \cdot 27$ дюймов, что, будучи удвоено, и произведение увеличено на одну десятую часть, мы получаем пять дюймов для длины требуемого столбика ртути.

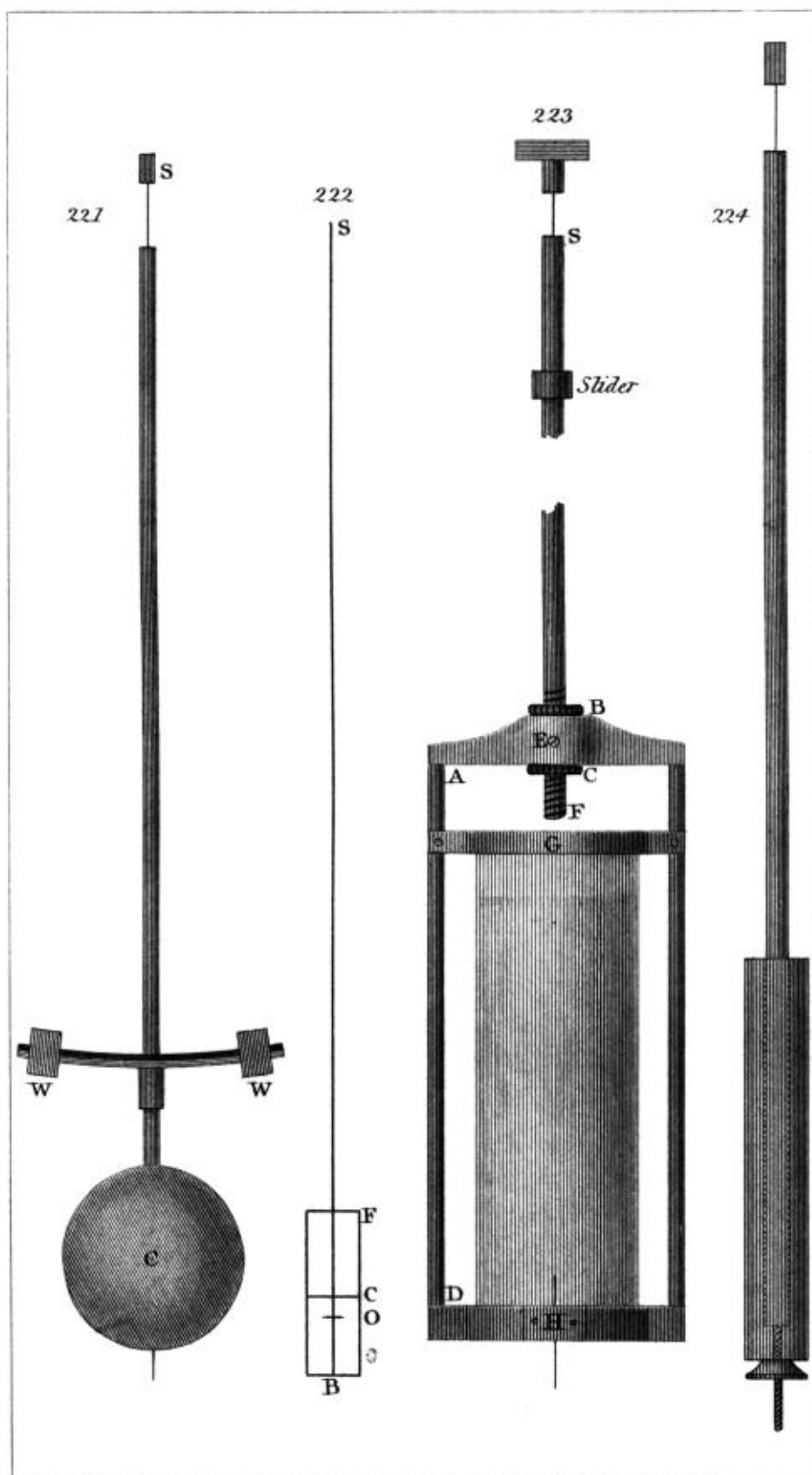
Компенсационный маятник из дерева и свинца, по принципу Ртутного маятника.

Если бы с помощью какого-либо изобретения древесины можно было сделать непроницаемой для влаги, она стала бы одним из самых удобных материалов, известных для изготовления компенсационного маятника. Не представляется, что по этому вопросу было проведено достаточно экспериментов, чтобы решить этот вопрос. Мистер Браун из Портленд-Плейс, посвятивший много своего времени и внимания самым деликатным исследованиям такого рода, как мы полагаем, обнаружил, что если тиковый прут хорошо позолочен, то впоследствии он не пострадает от влаги. В любом случае, подготовленный таким образом маятник намного превосходит то, что он делает, когда такая подготовка отсутствует.

Мистер Бейли в статье, на которую мы ранее ссылались, предлагает сконструировать экономичный маятник с помощью свинцового цилиндра и стержня из проволоки. Он предпочитает свинец цинку из-за его более низкой цены и легкости, с которой ему можно

придать требуемую форму; и поскольку между ними нет существенной разницы в скорости расширения, он в равной степени применим для этой цели.

Пусть длина разделочного стержня будет равна 46 дюймам. Затем, чтобы найти длину свинцового цилиндра, чтобы компенсировать это, мы имеем в таблице II $\cdot 1427$ для такого маятника; умножая это на 46, произведение удваивается, и к нему добавляется одна десятая результата, что дает длину свинцового цилиндра $14\cdot44$ дюйма. Компенсация мистера Бейли составляет $14\cdot3$ дюйма.



Капитан. Кейтер, дел. Х. Адлард, Шотландия

Лондон, издательство Longman & Co.

Стержень рекомендуется изготавливать диаметром около трех восьмых дюйма: свинцовый цилиндр должен быть отлит с отверстием в центре, через которое будет совершенно свободно проходить цилиндрический конец стержня. Цилиндр опирается на гайку, которая обычным образом навинчивается на конец стержня. Этот маятник представлен на [рис. 224](#).

Мистер Бейли предлагает отрегулировать маятник почти до заданной скорости с помощью винта в нижней части, а окончательную регулировку производить с помощью ползунка, перемещающегося вдоль стержня. Действительно, это средство регулировки, которое мы бы рекомендовали использовать в каждом маятнике.

Маятник Смитона.

Мы завершим наш рассказ о компенсационных маятниках описанием того, который изобрел мистер Смитон. Компенсация температуры в этом маятнике осуществляется путем объединения двух режимов, которые были так подробно описаны в предыдущей части этой статьи.

Стержень маятника изготовлен из цельного стекла и обычным образом снабжен снизу стальным винтом и гайкой. На стеклянный стержень свободно надевается полый цинковый цилиндр толщиной около восьмой части дюйма и длиной около 12 дюймов, который опирается на гайку в нижней части стержня маятника.

Поверх цинкового цилиндра проходит трубка, сделанная из листового железа. Край этой трубки вверху загнут внутрь и имеет насечку, позволяющую это осуществить. Таким образом, образуется фланец, с помощью которого железная трубка опирается на цинковый цилиндр. Нижний край железной трубки вывернут наружу, образуя основание, предназначенное для поддержки свинцового цилиндра, который мы сейчас опишем.

Свинцовый цилиндр длиной более 12 дюймов отливают с отверстием по оси такого диаметра, чтобы он мог свободно, но без тряски, скользить по железной трубе, по которой он проходит и на нижнем конце которой он поддерживается.

Теперь цинк, опирающийся на гайку и расширяющийся вверх, поднимет всю оставшуюся часть компенсатора. Этому расширению вверх будет немного противодействовать меньшее расширение железной трубки вниз, которая несет с собой свинцовый цилиндр. Свинцовый цилиндр теперь действует по принципу ртутного маятника и, расширяясь вверх, вносит свой вклад в то, что требовалось для восстановления центра колебаний на надлежащем расстоянии от точки подвешивания.

Как нам сообщили, этот маятник хорошо работает на практике, и нам неизвестно, публиковалось ли ранее какое-либо его описание.

Метод расчета длины трубок, необходимых для формирования компенсатора, очень прост; ничего больше не требуется, кроме как найти длину цинка, растяжение которого равно растяжению стержня маятника.

Пусть стержень маятника будет сделан из стекла толщиной 43 дюйма, пружина длиной полтора дюйма, а винт между концом стеклянного стержня и гайкой - на полдюйма, в результате получится два дюйма стали и 43 дюйма стекла.

Теперь, чтобы найти длину цинка, которая компенсирует толщину стекла, мы имеем из [таблицы II](#). для стекла и цинка $\cdot 2773$, что, умноженное на 43, дает 11·92 дюйма. Аналогичным образом мы получаем в качестве компенсации за два дюйма стали 0,74 цинка, что при добавлении к 11·92 дает 12·66 дюймов для общей длины цинкового цилиндра.

Теперь, если железная трубка и свинцовый цилиндр будут иметь ту же длину, что и цинковый, и расположены так, как мы описали, компенсация будет идеальной.

Чтобы доказать это, найдите с помощью разложений, приведенных в [Таблице I](#), фактическое разложение каждой изпозиций, используемых в маятнике, и мы получим следующие результаты:—

Расширение 12·66 дюймов цинка, расширяющегося вверх, составляет	· 0002186
Вычитаем расширение 12 · 66 дюймов железа вниз	· 0000869
	—————
Остаточный эффект расширения вверх, относящийся к нижнему концу железной трубки	· 0001317
Теперь, что касается свинца.—По принципу ртутной компенсации вычтите одну десятую часть длины цилиндра и возьмите половину оставшегося, и мы получим шесть дюймов свинца, расширение которого вверх равно	·0000955
	—————
Общее расширение компенсации вверх	·0002272
	—————
Чтобы найти расширение стержня, мы имеем расширение 43 дюймов стекла	·0002059
двух дюймов стали	·0000127
	————— ———
Полное расширение стержня маятника	·0002186

Достаточно близкое совпадение с ранее найденной компенсацией.

Поскольку мы считаем, что были достаточно ясны в нашем описании этого маятника, конструкция которого не представляет никаких трудностей, мы думаем, что его гравированное изображение было бы излишним.

До сих пор мы говорили только о компенсации температуры; но существует ошибка другого рода, на которую иногда настаивали, возникающая из-за изменения плотности атмосферы. Если увеличить плотность атмосферы, маятник будет испытывать большее сопротивление, вследствие чего вибрационная дуга уменьшится, и маятник будет вибрировать быстрее. Этому, однако, в некоторой степени противодействует повышенная плавучесть атмосферы, которая, действуя вопреки силе тяжести, заставляет маятник вибрировать медленнее. Если бы один эффект в точности соответствовал другому, очевидно, что ошибки не возникло бы; и в статье мистера Дэвиса Гилберта, президента Лондонского королевского общества, опубликованной в *Quarterly Journal* за 1826 год, он доказал, что по счастливой случайности дуга, по которой обычно заставляют колебаться маятники часов, является дугой, по которой происходит компенсация ошибки. Эта дуга для маятника с латунным стержнем составляет $1^{\circ} 56' 30''$ с каждой стороны от перпендикуляра, а для ртутного маятника - $1^{\circ} 31' 44''$, или около полутора градусов.

Хорошо известно, что если маятник колеблется по дуге окружности, то время колебаний будет меняться почти так же, как квадраты дуг; но если бы маятник можно было заставить вибрировать по циклоиде, то время его колебаний по дугам различной протяженности тогда оставалось бы неизменным. Поэтому Гюйгенс и другие пытались добиться этого, поместив пружину маятника между щеками циклоидной формы.

Когда используются спусковые механизмы, которые не обеспечивают неизменный импульс маятнику, усилие может неравномерно передаваться по цепочке часов из-за неизбежных дефектов изготовления, и дуга вибрации может несколько увеличиться или уменьшиться по этой причине. Найти средство от этого, безусловно, желательно.

Автор этой статьи несколько лет назад представил себе способ, который, по его мнению, также был предложен другими, с помощью которого, по его замыслу, маятник можно было бы заставить описывать дугу, приближающуюся по форме к циклоиде. Пружина маятника имела треугольную форму, и острие или вершина была закреплена в верхней части стержня маятника, при этом основание треугольника образовывало ось подвески. Теперь очевидно, что когда маятник находится в движении, пружина будет сопротивляться изгибу на оси подвешивания с силой, в некотором роде пропорциональной основанию треугольника.

Предположим, что маятник достиг предела своих колебаний; пружина будет иметь изогнутый вид; и если затем измерить расстояние от точки подвешивания до центра колебаний, то оно, очевидно, вследствие кривизны пружины будет короче расстояния от точки подвешивания до центра колебаний, измеренного, когда маятник находится в перпендикулярном положении и, следовательно, когда пружина совершенно прямая.

Основание треугольника можно уменьшить или сделать пружину тоньше; любое из этих действий уменьшит его действие. Мы не можем сказать, как этот план может сработать при дальнейших испытаниях, поскольку в то время не было проведено достаточного количества экспериментов, чтобы сделать окончательный вывод.

Таким образом, мы завершили наш рассказ о компенсационных маятниках; но прежде чем мы завершим, будет вполне приемлемо, если мы предложим несколько замечаний по некоторым моментам, которые могут оказаться полезными на практике.

Рычажок маятника должен быть прочно прикреплен либо к стене, либо к корпусу часов, а не к самим часам, как это иногда делается и что приводит к значительной неравномерности их

частоты, начиная от движения, передаваемого точке подвешивания. Мы предпочитаем кронштейн или полку из чугуна или латуни, на которой могут быть закреплены часы, а кран с маятником прикреплен к их перпендикулярной задней крышке. Этот кронштейн может быть либо привинчен к задней стенке корпуса часов, либо, что является лучшим способом, надежно прикреплен к стене; и если использовать последний вариант, корпус часов в целом может быть защищен от атмосферных воздействий или от пыли, который, таким образом, не имеет связи ни с часами, ни с маятником.

Точка подвешивания должна быть четко определена и неподвижна. Это может быть легко осуществлено после того, как маятник примет направление силы тяжести, с помощью прочного винта, входящего в кран (который должен быть очень прочным) с одной стороны и прижимающего плоский кусок латуни к пружине.

Импульс должен подаваться в той плоскости стержня, которая совпадает с плоскостью вибрации, проходящей через ось стержня. Если импульс будет дан в какой-либо точке перед этой плоскостью или позади нее, вероятным результатом будет дрожащее неустойчивое движение маятника.

Несколько грубых попыток и перемещение груза приблизят маятник к предполагаемому времени вибрации, которое следует оставить немного медленным; при этом бобышку следует прочно прикрепить к стержню, если форма маятника позволяет это, с помощью штифта или винта, проходящего через его центр.

Более тонкая регулировка может быть выполнена путем смещения ползунка, которым маятник должен быть установлен на стержне.

Мистер Браун (о котором мы говорили ранее) применяет следующий очень деликатный способ регулировки частоты вращения, который будет сочтен чрезвычайно удобным, поскольку нет необходимости останавливать маятник для внесения требуемого изменения. Установив с помощью эксперимента влияние, оказываемое на ход часов, путем помещения на боб груза, равного заданному количеству зерен, он готовит несколько меньших гирь из листового свинца, которые загибаются вверх по углам, чтобы их можно было удобно удерживать пинцетом, и влияние этих маленьких гирь на ход часов будет, конечно, известно пропорционально. Поскольку предполагается, что скорость не соответствует норме, грузики, необходимые для исправления этого, можно без труда поместить на качалку маятника или на какую-нибудь удобную плоскую поверхность, расположенную для их размещения; и если потребуется снять какой-либо из грузиков, это легко можно сделать с помощью тонких щипцов, не создавая ни малейшего нарушения движения маятника.

КОНЕЦ МЕХАНИКИ.

Лондон:
Споттисвудс и Нью-стрит-сквер Шоу
.

СНОСКИ:

[С.1](#) по 16 Точнее

1
12

футов, или 193 дюйма.

[2](#) Это соотношение составляет почти 31 416 к 10 000.

[3](#) Ларднер о паровой машине, пароходстве, автомобильных дорогах и железных дорогах. 8-е издание. 1851.

[4](#) От греческих слов *тахос* скорость и *метрон* мера.

[5](#) Theatrum Machinarum, том ii. стр. 36. рис. 3.

[6](#) В строго математическом смысле траектория точки Р представляет собой кривую, а не прямую линию; но в игре, данной ей в приложении к паровой машине, она проходит только часть всего своего местоположения, и эта часть, проходящая одинаково по обе стороны от точки перегиба, радиус кривизны бесконечен, так что на практике отклонение от прямой линии при соблюдении надлежащих пропорций стержней незаметно.

[7](#) Изменение высоты ртутного столба (предположительно равное 6

1
2

дюймов высотой) при изменении температуры на $\pm 16^{\circ}$ температура составит всего $\pm$

1
100

дюйма, или, другими словами,

1
100

на дюйм будет равняться общему отклонению от его *среднего* состояния на изменение температуры на 32° . Следовательно, вероятно, что в большинстве случаев умеренного изменения температуры только *центр* столбика ртути поднимается и опускается, в то время как внешние части остаются прикрепленными к стенкам стеклянного сосуда. Именно с целью устранения этого неудобства Генри Браун, эсквайр из Портленд-Плейс (я полагаю), первым предложил кусок плавающего стекла.